Collection
études et
recherches

L'implantation de MARKAL au Québec : la méthodologie et les résultats

Communications présentées dans le cadre du séminaire MEDEE-MARKAL tenu le 27 octobre 1983 à Montréal

août 1984

5-4045/

L'implantation de MARKAL au Québec : la méthodologie et les résultats

Communications présentées dans le cadre du séminaire MEDEE-MARKAL tenu le 27 octobre 1983 à Montréal

Août 1984

Dépot légal—1° trimestre 1985
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN:2-550-11887-1

Le 27 octobre 1983 se tenait, à Montréal, le séminaire MEDEE-MARKAL, organisé conjointement par l'Ecole des Hautes Etudes Commerciales et par le ministère de l'Energie et des Ressources. Au cours de ce séminaire, consacré à l'évaluation à long terme de la demande et de l'offre d'énergie au Québec, étaient présentées un certain nombre de communications concernant l'application du modèle MARKAL au Québec, (modèle de programmation mathématique de planification énergétique globale) les premiers résultats obtenus ainsi que les possibilités de coupler les modèles MARKAL et MEDEE.

Le document ci-après regroupe trois articles tirés de ces communications, dont le premier, qui fait état des récents développements concernant la modélisation énergétique à l'aide de la programmation mathématique, a pu être réalisé grâce au soutien de la CEE dans le cadre d'un accord de coopération entre le Canada et la CEE.*

---

*EC-CANADA Framework Agreement 6-7-76, Cooperation in the field of Science and Technology.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
Séminaire MEDEE-MARKAL - Programme Officiel	1
Programmation mathématique et modélisation énergétique - Jacqueline Boucher et Yves Smeers	1
MARKAL-QUEBEC: Un modèle prospectif du système énergétique du Québec - C. Berger, G. Côté, A. Haurie, R. Loulou et M. Normandin	33
Vers un couplage entre MEDEE et MARKAL basé sur la recherche d'un équilibre partiel réglementé - C. Berger, A. Haurie, G. Lafrance, R. Loulou, P. Marcotte et J.P. Surprenant	89

*

SÉMINAIRE
MÉDÉE-MARKAL
PROGRAMME OFFICIEL

9 h Discours d'ouverture par M. Richard Pouliot, sous-ministre associé à l'Énergie, ministère de l'Énergie et des Ressources.

Première séance: La méthode MÉDÉE

Président: M. Gilles Tousignant, directeur des Études économiques et financières, Direction générale de l'analyse économique et financière (D.G.A.), ministère de l'Énergie et des Ressources.

9 h 15 «L'approche MÉDÉE et son application dans le monde», par M. Bertrand Château, directeur, Institut économique et juridique de l'énergie, Grenoble.

10 h «Le contexte socio-économique à long terme et les principaux résultats sur la demande d'énergie», par M. Jean-Pierre Pellegrin, directeur général de l'Analyse économique et financière, ministère de l'Énergie et des Ressources.

10 h 30 Pause café

10 h 45 «Le système urbain: méthodologie et résultats», par M. Gaétan Lafrance, agent de recherche, Institut national de la recherche scientifique — Énergie.

11 h 15 «Le système industriel: méthodologie et résultats», par M. Gaétan Lafrance, agent de recherche, Institut national de la recherche scientifique — Énergie.

11 h 45 «Le système des transports: méthodologie et résultats», par M. Roger Corbeil, responsable de groupe de l'analyse quantitative et de l'information statistique, D.G.A., ministère de l'Énergie et des Ressources.

12 h 15 Dîner

Deuxième séance: La méthode MARKAL

Président: M. Gilles Tousignant, directeur des Études économiques et financières, Direction générale de l'analyse économique et financière, (D.G.A.), ministère de l'Énergie et des Ressources.

14 h «Programmation mathématique et modélisation énergétique», par M. Yves Smeers, C.O.R.E., Université Louvain-la-Neuve, Belgique.

14 h 45 «MARKAL-Québec», méthodologie et résultats», par M. Claude Berger, chercheur du GERAD, École des Hautes Études Commerciales.

15 h Pause café

15 h 15 «Couplage MÉDÉE-MARKAL», par M. Alain Haurie, directeur du GERAD, École des Hautes Études Commerciales.

16 h Table ronde — Discussion sur l'utilisation des modèles MÉDÉE et MARKAL comme outils de planification énergétique.

Modérateur: M. Alain Dubuc, journaliste aux pages économiques du journal «La Presse».

Participants: M. Bertrand Château, directeur, Institut économique et juridique de l'énergie, Grenoble.

M. Peter L. Miles, économiste en chef & directeur, Direction de l'Économique, Office national de l'énergie, Ottawa.

M. Richard Pouliot, sous-ministre associé à l'Énergie, ministère de l'Énergie et des Ressources.

M. Yves Smeers, C.O.R.E., Université Louvain-la-Neuve, Belgique.

17 h 30 Cocktail offert par le ministère de l'Énergie et des Ressources et l'École des Hautes Études Commerciales.

PROGRAMMATION MATHEMATIQUE ET MODELISATION ENERGETIQUE*

Jacqueline BOUCHER et Yves SMEERS

Résumé

Nous examinons les possibilités d'utilisation des modèles d'optimisation de flux énergétiques dans des systèmes intégrés incluant des modèles de demande économétriques, d'optimisation ou de simulation. La discussion est conduite à partir des modèles MARKAL et EFOM.

*Texte présenté au séminaire MEDEE-MARKAL, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, Université de Montréal, Montréal, 27 octobre 1983.

1. INTRODUCTION

La modélisation énergétique et la programmation mathématique ont fait ensemble leurs premiers pas. C'est à la fin des années 50 que A. Manne [1963] construisit son modèle de gestion des raffineries qui allait immédiatement se révéler un test important pour les premiers logiciels d'optimisation (Orchard-Hays [1978]); à la même époque, "Electricité de France" (Massé et Gibrat [1957]) élaborait, dans le cadre de la programmation linéaire, les modèles de planification des équipements de production dont les successeurs sont, sous diverses formes, largement utilisés aujourd'hui. Ces premiers pas communs ne sont pas restés sans suite et la modélisation, à l'intérieur des secteurs énergétiques, a toujours largement alimenté divers domaines de la programmation mathématique en problèmes test. Les années qui ont suivi le premier choc pétrolier ont vu l'apparition d'une nouvelle classe de modèles énergétiques. Alors que l'accent avait surtout été mis jusque là sur les outils sectoriels répondant à des questions d'exploitation ou d'investissement ponctuelles, on a vu se développer à partir de 1973 une classe de modèles globaux considérant tout à la fois l'ensemble des producteurs et transformateurs d'énergie et une part plus ou moins importante de ses consommateurs. Bien que souvent formulés selon les mêmes principes que les modèles sectoriels, ces outils apparaissent avec un rôle différent : construits par des organismes plus ou moins indépendants des secteurs, ils fournissent une image globale du role des divers vecteurs énergétiques dans l'économie plutôt que d'aider directement à des prises de décision ponctuelles. Leur manque de finesse dans la représentation des secteurs, conséquence directe de leur prétention à la globalité, les empêcherait d'ailleurs bien souvent d'entrer en concurrence directe avec les outils de ces derniers. Plutôt que d'aider à l'analyse fine d'un projet, leur intérêt réside dans la représentation des interactions au niveau de la production et de la consommation d'énergie qu'ils permettent. En ce sens, ils ont pour objectif d'éclairer plusieurs des questions qui se sont posées après 1973, tel le rôle possible des nouvelles technologies, des économies d'énergie ou des substitutions entre vecteurs énergétiques.

Parmi les nombreux outils d'analyse développés après 1973, les modèles de flux énergétiques jouent sans doute un rôle particulier du fait qu'ils se basent sur des descriptions du système énergétique très semblables à celles

utilisées dans les secteurs et qu'ils relèvent de méthodologies connues et éprouvées. Ils sont d'une certaine manière des standards de modélisation : MARKAL (Abilock et al [1980]) qui est au centre de notre préoccupation dans ce texte est utilisé dans 14 pays de l'Agence Internationale de l'Energie; EFOM (Van der Voort [1982]), un modèle voisin construit à la Commission des Communautés Européennes est exploité dans les 10 pays membres ainsi qu'au Portugal et en Espagne. Enfin, étant formulés comme des problèmes de programmation linéaire, ces modèles se basent sur des logiciels puissants et robustes qui sont accessibles commercialement à travers le monde.

Malgré ces différents avantages, les modèles de flux énergétiques ne suffisent pas nécessairement à l'analyse de la politique énergétique. Le gouvernement du Québec dans son approche des questions énergétiques disposera à la fois de MARKAL et du modèle de demande MEDEE (IEJE [1982]). La Commission des Communautés Européennes suit la même approche et, dans ses analyses à long terme (DG XII), se base également sur un modèle de flux énergétiques (EFOM) et sur MEDEE. Enfin les études de l'A.I.E. utilisent tantôt MARKAL (IEA ETSAP [1984]), tantôt des modèles économétriques de la demande (IEA [1982]). Etant donné cette dichotomie, il est utile d'examiner les possibilités d'intégration des modèles de flux énergétiques (comme MARKAL) avec d'autres outils plus orientés vers la demande. Puisque les modèles de flux énergétiques sont exploités à partir de la programmation mathématique, on peut s'attendre à voir celle-ci jouer également un rôle dans le traitement du modèle couplé. C'est ce point qui est l'objet de ce texte.

Il n'est évidemment pas possible d'examiner le problème du couplage d'un modèle de flux énergétiques et d'un modèle de demande en toute généralité; les outils disponibles ont trop de spécificités qui empêchent d'en considérer des versions abstraites applicables à tous les cas. Pour cette raison, la discussion sera concentrée sur le modèle MARKAL qui est celui utilisé au Québec; des considérations analogues peuvent évidemment être faites à partir d'EFOM ou de tout autre modèle de flux énergétiques. Le texte est organisé comme suit : la section 2 rappelle quelques caractéristiques principales de MARKAL et en introduit deux versions particulières sur lesquelles le reste de la discussion est articulé. La première version se prête au couplage avec des modèles de demande d'énergie finale dans le cadre d'un équilibre partiel; ce point est traité à la section 3. La deuxième

version de MARKAL introduite dans la section 2 mène directement à des modèles d'équilibre général qui sont discutés en section 4.

2. MARKAL : CARACTERISTIQUES GENERALES - DEUX VERSIONS PARTICULIERES

Le type d'élasticité pris en compte dans la représentation de la demande énergétique finale est une des caractéristiques essentielles des modèles de flux énergétiques. Nous rappelons ici qu'on entend par demande finale d'énergie, celle qui s'exprime en combustibles énergétiques particuliers comme l'électricité, le gaz, les distillats moyens, ...; la demande d'énergie utile traduit quant à elle la demande de service fourni par l'énergie. Nous considérons trois types de modèles selon que la demande d'énergie finale y est exogène, dépend des prix uniquement ou est fonction à la fois des prix et du revenu. MARKAL part d'une demande d'énergie utile exogène mais permet des substitutions de technologie au niveau de la satisfaction de celle-ci; la demande d'énergie finale y dépend donc uniquement des prix. Nous introduisons dans cette section deux nouvelles versions de MARKAL; la demande d'énergie finale est exogène dans la première d'entre elles, elle dépend à la fois des prix et du revenu dans la seconde.

MARKAL est formulé comme un modèle de l'ensemble du système énergétique allant des activités d'extraction d'énergie primaire à celles de consommation d'énergie utile. Une description d'étaillée peut en être trouvée dans Abilock et al [1981] ou dans le manuel d'utilisation. Les quelques éléments qui suivent sont rappelés pour faciliter la discussion.

MARKAL subdivise l'ensemble du système énergétique en quatre ensembles principaux d'activité : la mise à disponibilité d'énergie primaire (SRC) (extraction, importation, exportation, mise en stock et prélèvement à partir des stocks), les procédés (PRC) de transformation d'une forme d'énergie en une autre, les installations de production (CON) de chaleur et/ou d'électricité et les activités de demande (DMD). Il considère également deux grandes classes de vecteurs énergétiques, à savoir ceux dont la demande est variable dans l'année (dans ce cas la chaleur et l'électricité) et les autres. Le modèle est alors formulé comme un programme linéaire à plusieurs périodes

dans lequel la demande d'énergie utile est exogène. De manière générale et sans entrer ici dans une quelconque analyse de ses variables et contraintes, le modèle se présente sour la forme :

$$\min cx \tag{1}$$

$$\text{s.c.q.} \quad Ax = b \tag{2}$$

$$x \geq 0 \,. \tag{3}$$

Considérons alors un partitionnement de l'ensemble des activités du système énergétique en production et transformation d'une part, consommation de l'autre. Les sources (SRC), procédés (PRC) et conversions (CON) constituent ainsi le premier sous-ensemble, les activités de demande (DMD) le second. Si nous désignons par x_1 et x_2 les vecteurs relatifs à ces deux classes d'activité, la matrice des contraintes peut-être partitionnée en sous-matrices

$$\begin{pmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \\ 0 & A_{32} \end{pmatrix}$$

où . $(A_{11} \quad 0)$ est l'ensemble des contraintes qui n'impliquent que des activités de production et transformation;

. $(0 \quad A_{32})$ est l'ensemble des contraintes qui n'impliquent que des activités de consommation;

. $(A_{21} \quad A_{22})$ est l'ensemble des autres contraintes.

Le modèle MARKAL peut ainsi s'écrire

$$\text{Min } c_1 x_1 + c_2 x_2 \tag{4}$$

$$\text{s.c.q.} \quad A_{11} x_1 = b_1 \tag{5}$$

$$A_{21} x_1 + A_{22} x_2 = b_2 \tag{6}$$

$$A_{32} x_2 = b_3 \tag{7}$$

$$x_1 \geq 0 \qquad x_2 \geq 0 \,. \tag{8}$$

Il est utile, pour interpréter ce partitionnement, de brièvement passer en revue la structure de MARKAL. Le modèle est constitué essentiellement de contraintes exprimant des conservations de matières (production et consommation d'énergie en chaque période, évolution de stocks d'énergie primaire ou de matières fissiles ou fertiles sur plusieurs périodes ...), de relations liant des variables d'exploitation d'une technologie (PRC, CON ou DMD) à sa capacité et enfin de contraintes techniques permettant d'arriver à une représentation satisfaisante des procédés (PRC) et des équipements de production de chaleur et/ou d'électricité (CON). Les contraintes liant x_1 et x_2 sont dès lors uniquement constituées de relations de livraison des activités de production et de transformation aux activités de consommation. Il est ainsi aisé de construire une version de MARKAL où la demande d'énergie finale est exogène. Supposons un mode de fonctionnement réalisable du secteur consommateur; celui-ci est représenté par un vecteur $\bar{x}_2$ qui satisfait

$$\bar{x}_2 \geq 0 \quad \text{et} \quad A_{32}\, \bar{x}_2 = b_2 .$$

La version cherchée de MARKAL s'écrit

$$\min c_1\, x_1 \tag{9}$$

s.c.q.

$$A_{11}\, x_1 = b_1 \tag{10}$$

$$A_{21}\, x_1 = b_2 - A_{22}\, \bar{x}_2 \tag{11}$$

$$x_1 \geq 0 . \tag{12}$$

Ce modèle reprend essentiellement la description des sources, procédés et moyens de conversion. Nous nous y réferons dans la suite comme le modèle MARKAL-PRODUCTION.

La construction d'un MARKAL avec demande d'énergie finale dépendant du revenu est plus complexe et requiert des notations supplémentaires. Partant de MARKAL-PRODUCTION, nous partitionnons le vecteur x_1 des activités selon les secteurs énergétiques dont elles relèvent. Si E dénote l'ensemble de ceux-ci, x_1 est décomposé en $\{x_{1i} , i \in E\}$ où x_{1i} désigne les activités du secteur i ainsi que les variables de livraison d'énergie

de i aux autres secteurs énergétiques ou à la demande finale. Il est à noter que ces partitionnements ne sont pas naturels à MARKAL et peuvent même demander l'introduction de nouvelles variables (par exemple pour calculer la livraison totale d'une forme d'énergie par un secteur). Nous reviendrons brièvement sur ce point plus loin. MARKAL, étant un modèle multitemporel, contient à la fois des variables représentant l'exploitation et les investissements en chaque procédé. Soit x^o_{1i} et x^I_{1i} respectivement les vecteurs des composantes de x_{1i} décrivant l'exploitation et les investissements dans le secteur i . Nous supposons que ces variables existent non seulement pour les procédés et activités de conversion (ce qui est le cas), mais également pour l'extraction que MARKAL représente actuellement sans capacité de production. Comme mentionné auparavant, la prise en compte de ces notions requiert des modifications au logiciel de génération du modèle : le concept du secteur énergétique n'est pas naturel à MARKAL; son introduction peut cependant se faire à peu de frais en complétant les données par des classes regroupant les activités de chaque secteur. La définition des variables de livraison est plus compliquée : elle demande l'introduction dans le modèle de relations faisant le bilan de toutes livraisons de chaque secteur par forme d'énergie. Enfin, l'utilisation de variables de capacité pour l'extraction implique une modification (très légère) de la représentation du système énergétique qui peut se traduire par quelques changements dans le comportement du modèle. Nous ne discuterons pas plus longuement ce sujet et supposerons par la suite que MARKAL-PRODUCTION permet le recours aux variables x^o_{1i} et x^I_{1i} .

Considérons un modèle économique multisectoriel écrit schématiquement comme suit

$$\text{Max } U(c) \tag{13}$$

$$\text{s.c.q.} \quad Dc + Vv - Ay - m + e \leq \hat{w} \tag{14}$$

$$-Kv + y \leq \hat{k} \tag{15}$$

$$\text{autres contraintes} \tag{16}$$

Comme pour la description de MARKAL, nous négligeons ici, afin de simplifier les notations, toute référence explicite à l'aspect intertemporel du

problème. L'interprétation des relations du modèle est immédiate : U(c) est une fonction d'utilité intertemporelle qui dépend de la consommation finale c . Dans les contraintes (14) de bilan matières, Dc et Vv représentent respectivement la demande due à la consommation finale et aux investissements; Ay est la production nette, m et e sont respectivement les importations et exportations. La contrainte (15) lie les activités dans l'économie aux investissements passés, toutes les autres contraintes sont résumées sous (16). Il n'est sans doute pas opportun de discuter longuement ici les interprétations économiques sous-tendant ce type de représentation et nous nous contenterons pour cette section de noter que le modèle est considéré comme décrivant un équilibre général multitemporel; U(c) est alors la fonction d'utilité d'un consommateur rationnel unique.

L'introduction, dans MARKAL, d'une demande d'énergie finale dépendant du revenu peut se faire en couplant MARKAL-PRODUCTION (nous ne discutons pas ici le couplage d'autres versions de MARKAL) avec le modèle économique multisectoriel. Celui-ci détermine en effet l'évolution du PNB en chaque année et sa répartition entre consommation privée et investissement; MARKAL-PRODUCTION, en choisissant les niveaux d'activité et d'investissement dans les secteurs énergétiques, détermine également les coûts marginaux des différents vecteurs mis sur le marché. Le couplage des deux modèles mène à une demande d'énergie finale dépendant à la fois du revenu et des prix. Il se fait selon trois principes que nous énonçons avant d'en discuter l'application.

Désignons comme précédemment par E l'ensemble des secteurs énergétiques de MARKAL-PRODUCTION. Nous partitionnons l'ensemble des secteurs du modèle économique en énergétiques et non énergétiques et supposons que l'ensemble des activités d'un secteur énergétique dans MARKAL-PRODUCTION correspond à la définition de celui-ci dans le modèle économique. Cette hypothèse, commode pour la suite de l'exposé, n'est pas sans imposer d'éventuelles modifications aux modèles : le secteur des mines dans l'économie comprendra souvent d'autres activités que l'extraction de combustibles énergétiques; satisfaire l'hypothèse demande de désaggréger le secteur mine du modèle économique de manière à arriver à un sous-secteur recouvrant exactement une classe d'activités de MARKAL-PRODUCTION. Nous pouvons maintenant énoncer les principes permettant de réaliser la liaison entre les modèles.

Principes de couplage

(i) La formation brute de capital d'un secteur énergétique dans le modèle économique est obtenue en agrégeant les investissements de ce secteur dans MARKAL-PRODUCTION. L'évolution du stock de capital est celle décrite dans MARKAL-PRODUCTION.

(ii) Le niveau d'activité d'un secteur énergétique dans le modèle économique est obtenu à partir des variables d'activité et de livraison de ce secteur dans MARKAL-PRODUCTION.

(iii) La demande en provenance de la partie non énergétique de l'économie pour les produits d'un secteur énergétique tels que représentés dans MARKAL-PRODUCTION s'obtient en désagrégeant la demande correspondante du modèle économique.

Pour examiner l'application de ces principes, considérons une partition des lignes et colonnes des contraintes (14) et (15) en composantes énergétiques et non énergétiques; nous supposons sans restriction réelle que V n'a pas de lignes énergétiques et notons par $A_{a,b}$ la sous matrice de A obtenue comme l'intersection des ensembles a et b de lignes et colonnes; si a ou b est l'ensemble de toutes les lignes ou colonnes, il est désigné par "." .

$$D_{NE,.}\, c + V_{NE,NE}\, v_{NE} + V_{NE,E}\, v_E - A_{NE,NE}\, y_{NE} - A_{NE,E}\, y_E - m_{NE} + e_{NE} \leq \hat{\omega}_{NE} \qquad (14')$$

$$D_{E,.}\, c - A_{E,NE}\, y_{NE} - A_{E,E}\, y_E - m_E + e_E \leq \hat{\omega}_E \qquad (14'')$$

$$- K_{NE,NE}\, v_{NE} + y_{NE} \leq \hat{k}_{NE} \qquad (15')$$

$$- K_{E,E}\, v_E + y_E \leq \hat{k}_E \qquad (15'')$$

L'application du principe (i) conduit à l'élimination complète des contraintes (15") : les liaisons entre les variables d'exploitation et de capacité dans les secteurs énergétiques sont en effet entièrement prises en compte dans MARKAL-PRODUCTION. La formation brute de capital dans le secteur énergétique i résulte par ailleurs des investissements réalisés dans celui-ci,

ce qui s'exprime comme

$$v_i = \alpha_i \, x^I_{1i} \qquad i \in E \,, \tag{17}$$

où α_i est un vecteur convertissant les unités physiques de MARKAL dans celles du modèle économique.

Considérons maintenant l'application du deuxième principe de liaison. Le niveau d'activité y_i d'un secteur énergétique s'obtient à partir des activités et livraisons de ce secteur dans MARKAL-PRODUCTION. On a donc

$$y_i = \beta_i \, x^o_{1i} \qquad i \in E \,, \tag{18}$$

où β_i sélectionne les activités pertinentes à la construction de y_i (par exemple uniquement les livraisons) et effectue les transformations d'unité. Puisque la consommation due à l'ensemble des secteurs énergétiques est explicitement prise en compte dans MARKAL-PRODUCTION, le terme $A_{E,E} \, y_E$ peut être éliminé de (14"). Par ailleurs les variables m_E et e_E disparaissent également pour laisser la place à des variables d'importation et d'exportation (variables de SRC) plus fines dans MARKAL-PRODUCTION. Ayant effectué ces transformations, (14") exprime la demande d'énergie finale des secteurs non énergétiques de l'économie soit

$$Z_E = D_{E,.} \, c - A_{E,NE} \, y_{NE} - \hat{w}_E \,. \tag{19}$$

Le troisième principe de couplage ventile la demande d'énergie finale du modèle économique dans celle de MARKAL-PRODUCTION. Plusieurs approches sont possibles selon l'information disponible; nous supposerons ici la situation la plus favorable où la consommation énergétique peut être ventilée par secteur industriel ou poste de consommation. Si $\tilde{E}$ désigne l'ensemble des biens apparaissant dans la demande finale de MARKAL-PRODUCTION et si nous supposons qu'il existe des matrices $D_{\tilde{E},.}$ et $A_{\tilde{E},NE}$ donnant la demande d'énergie finale résultant de c et y_{NE} ainsi que des ressources initiales $\hat{w}_{\tilde{E}}$, la demande d'énergie finale de MARKAL-PRODUCTION est alors

$$Z_{\tilde{E}} = D_{\tilde{E},.} \, c - A_{\tilde{E},NE} \, y_{NE} - \hat{w}_{\tilde{E}} \,. \tag{20}$$

Nous nous référons dans la suite au modèle couplé comme à MARKAL-ECONOMIE.

3. COUPLAGE MARKAL PRODUCTION - MODELE DE DEMANDE

La demande, dans MARKAL, est spécifiée en énergie utile. Pour passer à l'énergie finale, le modèle choisit les technologies de consommation (DMD) permettant de satisfaire les services énergétiques au moindre coût. Le calcul de la demande d'énergie finale dépend donc à la fois de la modélisation plus ou moins fine des consommateurs et du calcul des prix des combustibles qui leur sont vendus. On peut envisager plusieurs extensions possibles de la représentation actuelle de la demande dans MARKAL qui mènent à des formulations plus ou moins différentes du modèle. C'est à ces extensions que la section est consacrée.

La figure 1 donne un schéma de la description de la consommation d'énergie dans MARKAL.

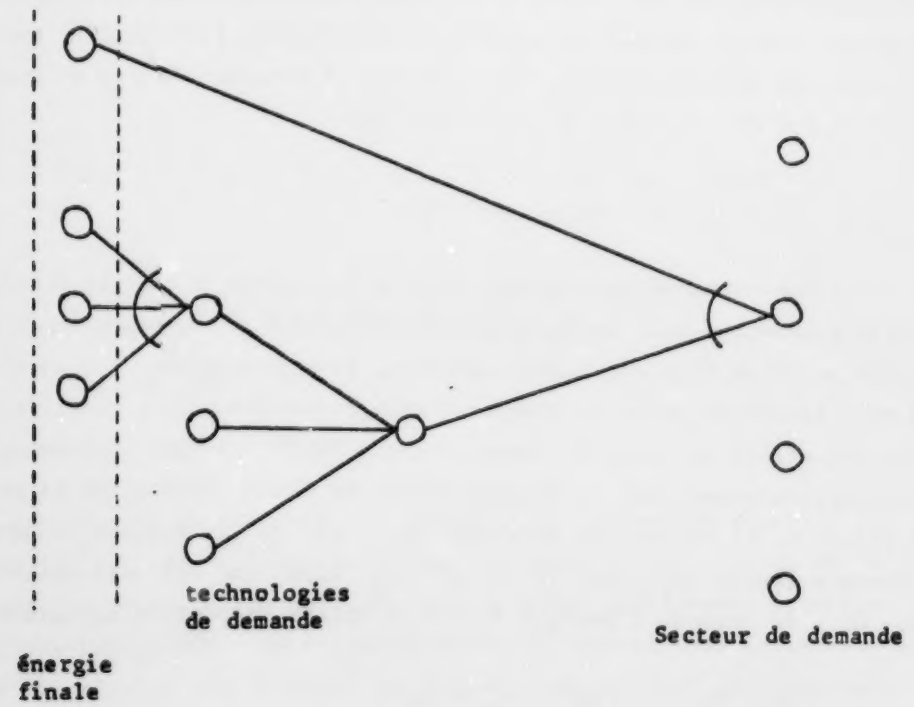


Figure 1 : Schéma de la représentation de la demande dans MARKAL

La demande est ventilée en un certain nombre de secteurs pour lesquels on donne les besoins en énergie utile; une fraction de celle-ci est spécifique, c'est-à-dire qu'elle se traduit directement en combustibles particuliers. Le reste peut être alimenté par plusieurs technologies qui, chacune, font appel à un ensemble de combustibles dans des proportions données. La concurrence entre les technologies de demande se fait au niveau des coûts d'investissement et d'exploitation (y compris les coûts de combustibles). Un exemple de cette modélisation est fourni par le chauffage des habitations unifamiliales représenté à la Figure 2 : on y envisage différents procédés dont le chauffage électrique direct et à accumulation ainsi que les chauffages individuels au mazout et au gaz.

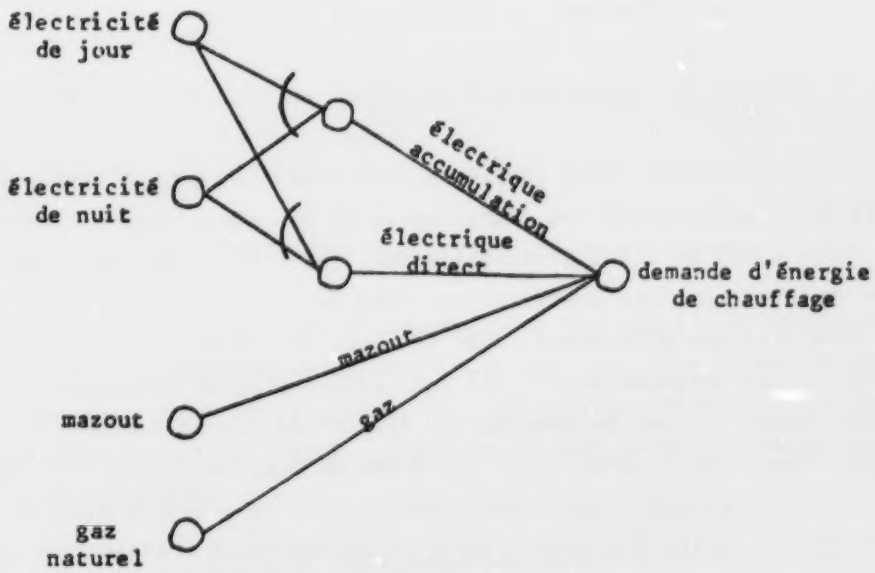


Figure 2 : Compétition entre divers modes de chauffage

Les chauffages électriques se différentient par leur coût d'investissement et leur consommation d'électricité de jour et de nuit; de manière générale, les modes de chauffage diffèrent par leurs coûts d'investissement et de fonctionnement. MARKAL détermine les coûts marginaux des différents combustibles à partir desquels se fait l'arbitrage entre procédés.

Il est possible d'examiner cette représentation de la demande par rapport au modèle MARKAL-PRODUCTION défini dans la section précédente : ceci est illustré à la Figure 3.

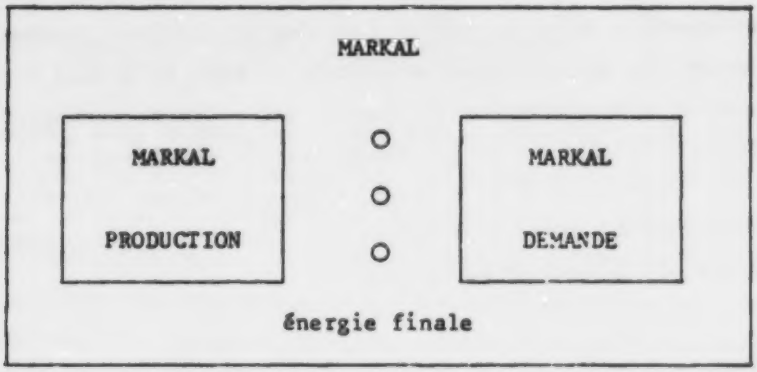


Figure 3 : Décomposition de MARKAL en PRODUCTION et DEMANDE

Cette décomposition amène plusieurs remarques. On peut n'être guère satisfait de la description des technologies de demande adoptées dans MARKAL : le choix y est en effet essentiellement limité à la satisfaction de l'énergie utile et il n'est guère facile, dans le contexte du logiciel existant de modéliser des phénomènes comme le choix de nouveaux procédés de fabrication, ou des contraintes propres aux technologies de consommation. Par ailleurs chaque secteur de demande est représenté par un ensemble d'équipements types, chacun de ceux-ci ayant une durée de vie, un coût d'investissement, un rendement propre. Cette description, si elle s'adapte bien au secteur énergétique où les équipements sont raisonnablement standardisés, n'est guère adéquate pour représenter les secteurs consommateurs où la taille des firmes influence directement, via les rendements d'échelle, les coûts des différentes unités. La parade à cette difficulté est simple en principe : il suffit de décrire plus finement les secteurs consommateurs en augmentant le nombre de procédés et en stratifiant chaque secteur selon la taille de ses entreprises. Le secteur consommateur est dans ce cas représenté schématiquement comme indiqué à la Figure 4; celle-ci se distingue essentiellement de la Figure 1 par le fait qu'on y a représenté explicitement une segmentation des secteurs consommateurs selon la taille des firmes après avoir introduit un niveau supplémentaire de substitution pour le choix des procédés techniques.

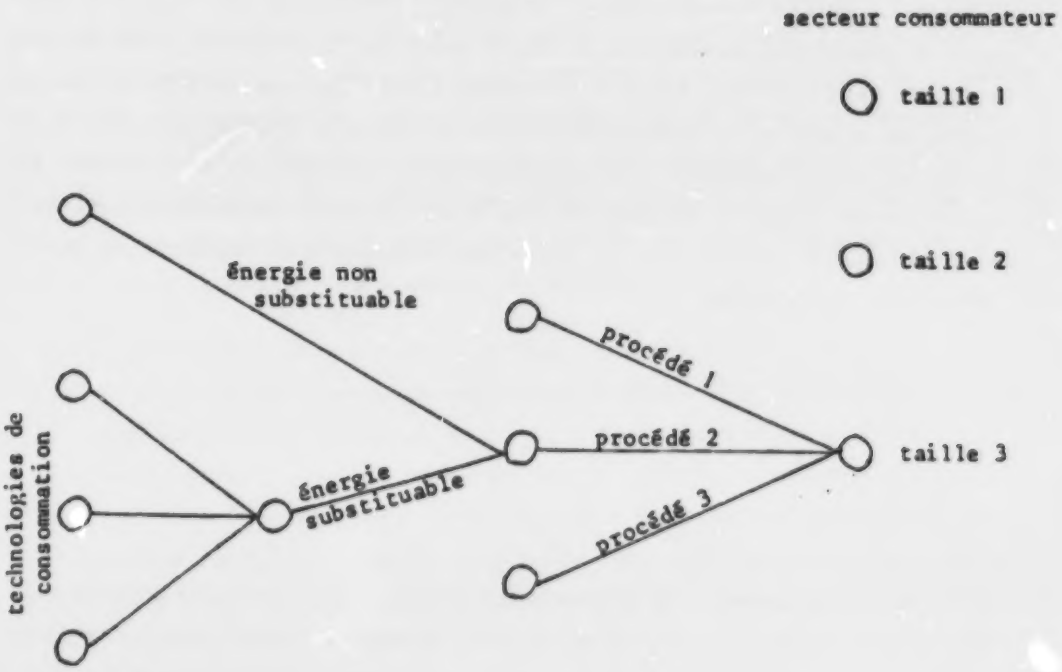


Figure 4 : Représentation plus désagrégée de la demande

Nous ne pousserons pas plus loin l'investigation des aspects de modélisation de cette démarche : elle mène à un outil plus réaliste dans la mesure où les substitutions sont mieux représentées, la contrepartie est évidemment la taille du modèle auquel on arrive. C'est ce dernier point qui va maintenant retenir notre attention.

Quel que soit le niveau de désaggrégation adopté pour représenter la demande, le modèle MARKAL ainsi étendu se présente toujours sous la forme

$$\text{Min } c_1 x_1 + c_2 x_2 \tag{4}$$

s.c.q.

$$A_{11} x_1 = b_1 \tag{5}$$

$$A_{21} x_1 + A_{22} x_2 = b_2 \tag{6}$$

$$A_{32} x_2 = b_3 \tag{7}$$

$$x_1 \geq 0 \quad x_2 \geq 0 \tag{8}$$

introduite dans la section précédente; le fait nouveau est maintenant la taille de la partie "consommateur" du modèle. Plusieurs approches, rigoureuses ou empiriques, permettent de tirer parti de la structure traduite par les relations (5) à (7); elles sont toutes basées sur une séparation du modèle en ses composantes MARKAL-PRODUCTION et reste du modèle que nous désignerons par MARKAL-DEMANDE. Considérons cette seconde partie du modèle où nous supposons connu le vecteur Π des prix des vecteurs énergétiques en chaque période de l'horizon. Le choix des secteurs consommateurs se fera en résolvant le problème

$$\text{Min } (c_2 - \Pi A_{22})\, x_2 \tag{21}$$

$$\text{s.c.q.} \quad A_{32}\, x_2 = b_3 \tag{22}$$

$$x_2 \geq 0 \,. \tag{23}$$

Si nous désignons respectivement par $x_2(\Pi)$ et $y(\Pi)$ la solution du problème et l'expression $b_2 - A_{22}\, x_2(\Pi)$, le modèle MARKAL peut être écrit comme suit : trouver Π et $x_2(\Pi)$ tels que le vecteur des variables duales du deuxième bloc de contraintes (26) dans MARKAL-PRODUCTION

$$\text{Min } c_1\, x_1 \tag{24}$$

$$\text{s.c.q.} \quad A_{11}\, x_1 = b_1 \tag{25}$$

$$A_{21}\, x_1 - y(\Pi) = 0 \tag{26}$$

$$x_2 \geq 0 \tag{27}$$

soit égal à Π .

Avant d'examiner quelques alternatives de traitement de ce problème, il est intéressant de mentionner certains avantages de la décomposition.

A la différence de MARKAL-PRODUCTION qui se présente comme un bloc fortement intégré, MARKAL-DEMANDE se prête aisément à une décomposition en bloc. Le secteur consommateur d'un modèle de flux énergétiques se présente en effet comme un ensemble de sous-secteurs qui ne sont couplés entre eux que par des relations de conservation des vecteurs énergétiques. Dans la version

de MARKAL-DEMANDE représentée par (21), (22) et (23), les secteurs consommateurs sont découplés les uns des autres et peuvent faire l'objet d'une optimisation séparée. La même décomposition peut être poursuivie si la représentation des secteurs est stratifiée en fonction de la taille des firmes : chaque partie d'un secteur correspondant à une certaine taille agit, en face de prix énergétiques Π, indépendamment des autres consommateurs. La demande $y(\Pi)$ se présente ainsi comme une somme de demandes individuelles $y^k(\Pi)$ correspondant à chacun des segments de secteur.

La formulation (24) à (27) de MARKAL se prête à d'autres interprétations : $y(\Pi)$ ne doit pas nécessairement provenir d'un MARKAL-DEMANDE formulé comme problème d'optimisation mais peut résulter d'un modèle économétrique ou de simulation. Le problème posé est ainsi celui de l'interaction d'un système de demande $y(\Pi)$ avec un modèle du type MARKAL-PRODUCTION. L'interaction peut être limitée au cas où Π est un vecteur de variables duales, elle peut aussi s'étendre à des situations où les prix sont calculés par des méthodes plus complexes. La fin de cette section est consacrée à quelques approches permettant de traiter ce problème. Deux cas sont considérés : $y(\Pi)$ est établi à l'aide d'un modèle économétrique ou vient d'un problème d'optimisation. D'autres circonstances sont examinées plus loin.

A) $y(\Pi)$ dérive d'un modèle économétrique

On suppose dans ce cas que $y(\Pi)$ est continûment différentiable et on distinguera deux sous problèmes en fonction des propriétés d'intégrabilité de $y(\Pi)$.

A.1. $y(\Pi)$ est intégrable

Supposons que $y(\Pi)$ soit également invertible et désignons par $\Pi(y)$ son inverse. $\Pi(y)$ est intégrable s'il existe une fonction $U(y)$ telle que

$$\nabla U(y) = \Pi(y) . \tag{28}$$

Cette propriété sera vérifiée lorsque les effets prix sont symétriques, c'est-à-dire

$$\frac{\partial y_i}{\partial \Pi_j} = \frac{\partial y_j}{\partial \Pi_i} . \tag{29}$$

Coupler MARKAL-PRODUCTION au modèle de demande revient à traiter le modèle intégré

$$\text{Min } c_1 x_1 - U(y) \tag{30}$$

s.c.q. $$A_{11} x_1 = b_1 \tag{31}$$

$$A_{21} x_1 - y = 0 \tag{32}$$

$$x_1 \geq 0 \tag{33}$$

pour lequel les conditions d'optimalité correspondent aux condition d'équilibre. Les avantages de cette approche sont évidents : d'une part, les conditions d'intégrabilité (symétrie des effets prix) sont souvent aisées à vérifier et d'autre part, le modèle peut être traité comme un programme non linéaire usuel. Cette approche a été mise en oeuvre dans divers modèles énergétiques (Kennedy [1974] et Manne [1976]).

A.2. $y(\Pi)$ n'est pas intégrable

Le cas le plus général est celui où la correspondance ne satisfait pas les conditions d'intégrabilité. Les causes en sont, soit la spécification du modèle de demande qui ne garantit pas des effets prix symétriques, soit le fait que ce dernier est établi pour un revenu constant (c'est le cas des modèles d'équilibre partiel) et ne satisfait pas normalement à ces propriétés (Ahn [1979]). Il faut alors recourir à des algorithmes spéciaux; nous mentionnerons brièvement deux approches particulièrement attrayantes.

L'algorithme PIES remplace le problème formulé avec une correspondance $y(\Pi)$ non intégrable par une suite de problèmes construits à partir de systèmes de demande approchés $\hat{y}(\Pi)$ satisfaisant les propriétés d'intégrabilité. Ainsi, si Π^o désigne le vecteur de prix obtenu à un certain stade de l'algorithme, le système approché $\hat{y}(\Pi,\Pi^o)$ est défini par

$$\hat{y}_i(\Pi,\Pi^o) = y(\Pi_1^o, \ldots, \Pi_{i-1}^o, \Pi_i, \Pi_{i+1}^o, \ldots, \Pi_n^o) . \tag{34}$$

Les effets prix croisés y sont nuls et satisfont donc trivialement les propriétés de symétrie.

L'algorithme du PIES est alors défini en considérant le problème d'équilibre approché

$$\text{Min } c_1 x_1 - \hat{U}(y) \tag{35}$$

s.c.q.

$$A_{11} x_1 = b_1 \tag{36}$$

$$A_{21} x_1 - y = 0 \tag{37}$$

$$x_1 \geq 0 \tag{38}$$

où $\hat{U}(y)$ est la fonction de surplus calculée par la correspondance $y(\Pi)$. L'algorithme s'énonce comme suit : partant d'un problème approché donné, trouver les variables duales $\tilde{\Pi}$ des contraintes (37) et la demande correspondante $y(\tilde{\Pi})$. Calculer la correspondance $\hat{y}(\Pi,\tilde{\Pi})$ approchée et définir un nouveau problème d'équilibre.

Les conditions de convergence de cet algorithme ont été étudiées en détail dans Ahn [1979]. Des résultats globaux existent pour le cas de systèmes de demande linéaires et des conditions de convergence locale sont disponibles dans le cas de demande non linéaire. La méthode a été utilisée abondamment dans les travaux du DOE [1979] dans le cas de modèles statiques et étendue au cas dynamique dans le modèle BALANCE (Daniel et Goldberg [1981]). Un de ses avantages est de se prêter à une mise en oeuvre basée sur des logiciels existants de programmation linéaire.

Le principe fondamental de l'algorithme du PIES est de se ramener à un système de demande intégrable en négligeant à chaque cycle les effets prix croisés. Les systèmes de demande linéaires

$$y(\Pi) = d - D\Pi \tag{39}$$

se prêtent à des calculs d'équilibre qui ne requièrent pas des simplifications aussi drastiques mais demandent la résolution d'un problème complémentaire linéaire. Une approche naturelle du problème d'équilibre est donc de la reformuler comme un problème complémentaire non linéaire que l'on traite par une suite de problèmes complémentaires linéaires. Cette approche, introduite par Mathiesen, a été explorée numériquement par Preckel [1983].

Son principe est le suivant. En vue de reformuler le problème du couplage MARKAL-PRODUCTION avec le système de demande, considérons le programme complémentaire suivant :

trouver (x_1, u, Π) tel que

$$x_1 \geq 0 \tag{40}$$

$$c_1 - u A_{11} - \Pi A_{21} \geq 0 \tag{41}$$

$$c_1 x_1 - u A_{11} x_1 - \Pi A_{21} x_1 = 0 \tag{42}$$

$$b_1 - A_{11} x_1 = 0 \tag{43}$$

$$b_2 - A_{21} x_1 - y(\Pi) = 0 . \tag{44}$$

Si $\tilde{\Pi}$ est le vecteur de prix trouvé à un certain stade de l'algorithme, on définit le système de demande approché

$$\hat{y}(\Pi) = y(\tilde{\Pi}) + \left(\frac{\partial y}{\partial \Pi}\right)_{\tilde{\Pi}} (\Pi - \tilde{\Pi})$$

$$= d - D\Pi .$$

Le problème complémentaire linéaire approximant le problème d'équilibre est obtenu en remplaçant (44) par

$$(b_2 - d) - A_{21} x_1 + D\Pi = 0 . \tag{44'}$$

B) <u>y(Π) est obtenu à partir d'un modèle d'optimisation</u>

Nous référant au couplage de MARKAL-PRODUCTION et d'un MARKAL-DEMANDE plus ou moins développé, $y(\Pi)$ est obtenu comme solution du problème

$$\min (c_2 - \Pi A_{22}) x_2 \tag{45}$$

$$A_{22} x_2 - y = 0 \tag{46}$$

s.c.q.

$$A_{32} x_2 = b_3 \tag{47}$$

$$x_2 \geq 0 . \tag{48}$$

La correspondance $y(\Pi)$ est constante par morceaux : l'espace des vecteurs Π est partitionné en un ensemble de régions où la base optimale du problème (45) - (46) - (47) - (48) reste constante. Il semble évidemment naturel dans ce cas, d'établir une procédure itérative entre MARKAL-PRODUCTION et le MARKAL-DEMANDE modifié ((45) - (46) - (47) - 48)). Ceci a été proposé par Wagner [1981] pour décomposer le National Coal Model (ICF [1976]). L'algorithme est le suivant. Si $\tilde{\Pi}$ est le vecteur obtenu à une certaine itération et $y(\tilde{\Pi})$ la demande correspondante, on résoud MARKAL-PRODUCTION pour trouver le coût minimum de satisfaction de $y(\tilde{\Pi})$, c'est-à-dire

$$\min c_1 x_1 \tag{49}$$

s.c.q. $$A_{11} x_1 = b_1 \tag{50}$$

$$A_{21} x_1 = y(\tilde{\Pi}) \tag{51}$$

$$x_1 \geq 0 \tag{52}$$

soit $\tilde{\tilde{\Pi}}$ le vecteur des variables duales de (51); le nouveaux prix est choisi comme

$$\Pi^* = \lambda \tilde{\Pi} + (1 - \lambda) \tilde{\tilde{\Pi}} \tag{53}$$

où λ est compris entre 0 et 1.

La solution du problème fournie par l'algorithme est obtenue en concaténant des solutions de base dans MARKAL-PRODUCTION et MARKAL-DEMANDE. Il s'agit là d'une base particulière du modèle MARKAL complet qui peut donc ne pas être optimale. La procédure doit donc être considérée comme une méthode heuristique permettant de trouver une (très) bonne solution de départ pour le simplex révisé habituel ou pour une approche de décomposition. Nous considérons brièvement ce second cas.

Soit $\{\Pi^k, k = 1, \ldots, K\}$ un ensemble de vecteurs prix trouvés lors d'une procédure itérative quelconque entre MARKAL-PRODUCTION et MARKAL-DEMANDE; soit x_2^k les vecteurs de demande correspondants. Il est possible d'initialiser une procédure convergente de résolution du modèle MARKAL complet par le MARKAL-PRODUCTION modifié suivant

$$\text{Min } c_1 x_1 + \sum_{k \in K} (c_2 x_2^k) \lambda_k \tag{54}$$

s.c.q.

$$A_{11} x_1 = b_1 \tag{55}$$

$$A_{21} x_1 + \sum_{k \in K} (A_{22} x_2^k) \lambda_k = b_2 \tag{56}$$

$$\sum_{k \in K} \lambda_k = 1 \tag{57}$$

$$x_1 \geq 0 \qquad \lambda_k \geq 0 \; . \tag{58}$$

Si Π^{K+1} est le vecteur dual des contraintes (56) du problème et x_2^{K+1} est la solution de MARKAL-DEMANDE qui lui est associé, il est possible d'augmenter le problème (54) - (58) du nouveau vecteur $(c_2 x_2^{K+1}, A_{22} x_2^{K+1} ; 1)$ et de continuer ainsi la procédure.

D'autres modifications de MARKAL-PRODUCTION peuvent être envisagées pour réaliser le couplage. Shapiro et White [1982] appliquent au National Coal model (ICF [1976]) une procédure de décomposition pouvant se transposer naturellement à notre problème. Considérons un nouveau MARKAL-PRODUCTION modifié, écrit comme

$$\text{Min } c_1 x_1 + \varphi(y) \tag{59}$$

s.c.q.

$$A_{11} x_1 = b_1 \tag{60}$$

$$A_{21} x_1 - y = 0 \tag{61}$$

$$x_1 \geq 0 \; . \tag{62}$$

Ce problème est équivalent à MARKAL si $\varphi(y)$ est défini comme

$$\varphi(y) = \text{Min } c_2 x_2 \tag{63}$$

s.c.q.

$$A_{22} x_2 = b_2 - y \tag{64}$$

$$A_{32} x_2 = b_3 \tag{65}$$

$$x_2 \geq 0 \; . \tag{66}$$

$\varphi(y)$ est une fonction polyhédrale qu'il est possible de représenter par

l'ensemble de ses plans supports soit

$$\max_t \Pi^t(b_2 - y) + v^t b_3 \qquad (67)$$

où (Π^t, v^t) sont les variables duales associées au MARKAL-DEMANDE ((64) - (65) - (66)). Le couplage entre les deux modèles s'établit comme suit. Considérons le MARKAL-PRODUCTION modifié

$$\text{Min } c_1 x_1 + \xi \qquad (68)$$

s.c.q.
$$A_{11} x_1 = b_1 \qquad (69)$$

$$A_{22} x_2 = b_2 - y \qquad (70)$$

$$\xi + \Pi^k y \geq \Pi^k b_2 + v^k b_3 \qquad k = 1 \ldots K \qquad (71)$$

où $\{(\Pi^k, v^k)\ , k = 1, \ldots, K\}$ sont les variables duales obtenues au cours des cycles précédents de l'algorithme. Soit y^{K+1} la valeur de y dans la solution de ce dernier problème. On résoud le MARKAL-DEMANDE suivant

$$\text{Min } c_2 x_2 \qquad (72)$$

s.c.q.
$$A_{22} x_2 = b_2 - y^{K+1} \qquad (73)$$

$$A_{32} x_2 = b_3 \qquad (74)$$

$$x_2 \geq 0\ ,$$

dont la solution founit un nouveau vecteur (Π^{K+1}, v^{K+1}) permettant de mettre à jour MARKAL-PRODUCTION pour un nouveau cycle.

Si l'approche précédente est parfaitement valable en principe, elle ne semble guère attrayante en pratique dans le cas du couplage entre MARKAL-DEMANDE et PRODUCTION. Outre la nécessité d'ajouter des lignes dans MARKAL-PRODUCTION (une opération peu naturelle à cause de l'organisation en colonnes des données d'un programme linéaire), elle requiert de traiter un MARKAL-DEMANDE non décomposable : les ressources globales portent en effet sur l'ensemble des secteurs consommateurs qui se trouvent ainsi couplés entre eux.

Les méthodes discutées jusqu'à présent s'appliquent essentiellement à des systèmes où la demande est fonction de prix égaux aux coûts marginaux. Beaucoup de marchés énergétiques ne satisfont pas à cette condition : il en est en particulier ainsi lorsque les prix incluent des taxes ou sont calculés comme des moyennes (Murphy et al [1981]). Un autre cas intéressant est celui où il existe des rigidités sur les prix. Ces circonstances apparaissent dans la tarification du gaz et de l'électricité. Greenberg et Murphy ont abordé le problème dans le cadre d'une modification de l'algorithme du PIES; comme pour ce dernier, on suppose que le système de demande est continûment différentiable. Des hypothèses supplémentaires (négligées ici) doivent également être imposées au système d'offre pour garantir la convergence.

Nous supposons que le secteur de production représenté dans MARKAL-PRODUCTION n'est pas régulé et que seule la formation des prix aux secteurs consommateurs fait l'objet de distortions par rapport au coût marginal. Cette situation est représentée schématiquement à la Figure 5, où apparaissent

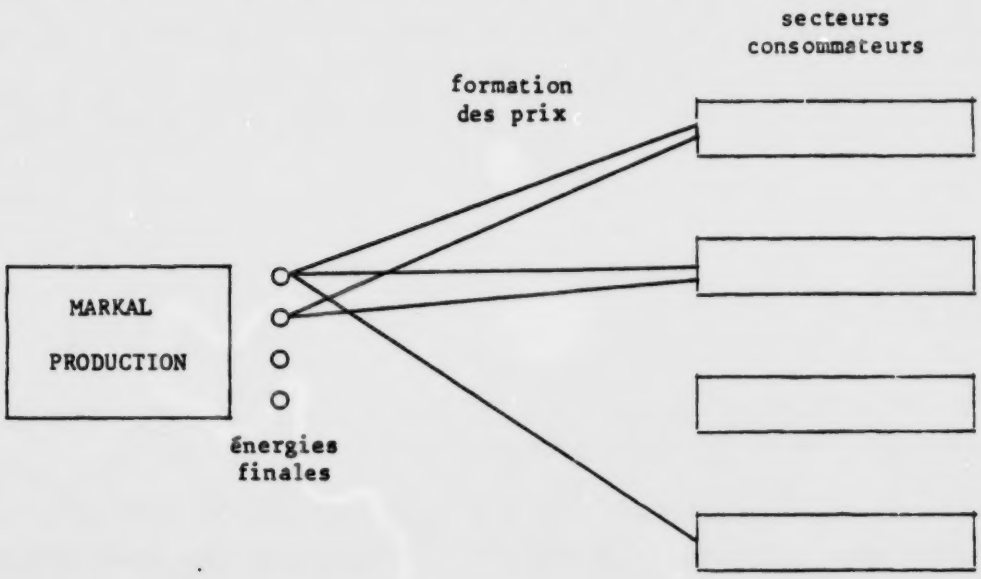


Figure 5 : Formation de prix différents des coûts marginaux

le découplage des différents secteurs consommateurs et des arcs illustrant les mécanismes de formation des prix. Le principe de la modification du PIES proposée par Greenberg et Murphy est d'imposer à ces arcs des coûts de transport correspondant aux différences entre le coût marginal et le prix réel affiché au secteur consommateur. En introduction à la discussion, considérons le modèle défini comme suit. Soit I l'ensemble des composantes de y : y_i est la quantité du vecteur énergétique i délivrée par MARKAL-PRODUCTION, y_i est réparti entre les différents secteurs consommateurs; soit y_{ij} la quantité du combustible i livrée au secteur j et t_{ij} le "coût de transport" unitaire sur l'arc (i,j) . Nous supposons que chacun des secteurs consommateurs a un système de demande intégrable $y_j(p_j)$ où p_j est le prix des vecteurs énergétiques pour le secteur j ; le problème

$$\text{Min } c_1 x_1 + \sum_{(i,j)} t_{ij} y_{ij} - \sum_j U_j(y_j) \tag{76}$$

s.c.q.

$$A_{11} x_1 = b_1 \tag{77}$$

$$A_{21} x_1 - y = 0 \tag{78}$$

$$\sum_j y_{ij} = y_i \tag{79}$$

simule un équilibre concurrentiel entre le secteur producteur d'énergie et les secteurs de demande lorsque la livraison de l'énergie est affectée d'un coût unitaire supplémentaire t_{ij} . Si Π_i désigne le coût marginal du combustible i à la production, on a dans ce cas

$$p_{ij} = \Pi_i + t_{ij} \tag{80}$$

et t_{ij} représente donc la différence entre le coût marginal du combustible et le prix affiché pour le consommateur j . Le principe de l'approche de Greenberg et de Murphy est de faire jouer à t_{ij} le rôle d'une différence entre le coût marginal et le prix au consommateur tel qu'établi par un principe de tarification. Pour en illustrer l'application, supposons que la règle de tarification puisse se représenter par une correspondance

$$p(\Pi, x_1) \tag{81}$$

et considérons $(\tilde{\Pi},\tilde{x}_1)$ un vecteur de solutions primale et duale du MARKAL-PRODUCTION modifié ((76) - (77) - (78) - (79)). On définit un nouveau modèle transformé en posant

$$\tilde{t}_{ij} = p_{ij}(\tilde{\Pi},\tilde{x}_1) - \tilde{\Pi}_i \qquad (82)$$

qui est la différence entre le coût marginal et le prix calculé par le principe de tarification. Des résultats de convergence ainsi que des discussions de circonstances ayant mené des cyclages sont disponibles.

Il est évidemment toujours possible d'utiliser un algorithme en dehors des circonstances pour lesquelles sa convergence est prouvée; le prix à payer est l'absence de garantie quant au résultat trouvé. Cette démarche semble la seule possible lorsque le système de demande est dérivé d'un modèle de simulation comme MEDEE (IEJE [1982]). Des notions importantes pour le couplage comme les variables duales perdent alors toute signification et la seule procédure utilisable dans ce cas semble être l'extension du PIES telle que proposée par Greenberg et Murphy.

4. DEVELOPPEMENTS DE MARKAL-ECONOMIE

Le modèle MARKAL-ECONOMIE résulte d'un couplage entre MARKAL-PRODUCTION et un modèle multisectoriel de l'économie. Nous oublierons dans cette section les composants du modèle intégré pour considérer celui-ci comme un tout dont certaines parties (énergétiques) ont fait l'objet d'un développement particulier. Plusieurs critiques peuvent être faites au modèle ainsi défini qu'il est possible de lever par des considérations techniques supplémentaires. Nous considérons pour la suite de cette section que le modèle MARKAL-ECONOMIE est représenté comme suit

$$\text{Max } U(x) \qquad (83)$$

$$\text{s.c.q.} \quad x + By \leq b \qquad (84)$$

où . U(x) est une fonction d'utilité dérivée d'un système de demande

. B est la matrice de production de l'économie.

Ce modèle peut faire l'objet de différentes généralisations; nous discuterons ici la représentation de substitutions dans les secteurs industriels et la prise en compte de plusieurs agents pour représenter la consommation finale.

A) Introduction de coefficients techniques variables

MARKAL-ECONOMIE divise l'économie en deux parties : les secteurs énergétiques font l'objet d'une description détaillée de leurs activités, le reste de l'économie est représenté par une colonne pour chaque secteur non énergétique. Cette dernière modélisation ne permet pas de représenter les changements pouvant apparaître, en réponse aux prix, dans la structure de la consommation des secteurs et il est intéressant d'examiner dans quelle mesure des modèles économétriques de demande industrielle peuvent être utilisés pour remédier à cette situation.

Soit (y_1, y_2) une partition du vecteur y en ses composantes énergétiques (qui font l'objet d'une description détaillée) et non énergétique (pour lesquelles la représentation consiste en un vecteur à coefficients fixes par secteur). Nous récrivons le modèle comme

$$\text{Max } U(x) \tag{85}$$

$$\text{s.c.q.} \quad x + B_1 y_1 + \sum_j B_{2j} y_{2j} \leq b \tag{86}$$

$$B_{2j} \in S_{2j} \tag{87}$$

$$x, y_1, y_2 \geq 0 \tag{88}$$

où S_{2j} est un ensemble convexe qui représente les possibilités de substitution des inputs du secteur j décrites par le modèle économétrique de celui-ci (S_{2j} est l'ensemble de production décrit par la fonction de production du secteur). Le modèle ((85) - (86) - (87) - (88)) ainsi formulé inclut alors une représentation des substitutions dans les secteurs énergétiques et non énergétiques.

La résolution du modèle peut se faire aisément en recourant à une procédure de construction de colonnes (Dantzig [1963]). Si $\{B_{2j}^k ; k = 1 \ldots K_j + 1\}$ est un ensemble de propositions correspondant à des structures de demandes du secteur j, on définit le maître problème suivant :

$$\max U(x) \tag{89}$$

$$\text{s.c.q.} \quad x + B_1 y_1 + \sum_j \sum_{k=1}^{K} B_{2j}^k y_{2j}^k \leq b \tag{90}$$

$$y_1 \geq 0 \qquad y_{2j}^k \geq 0 \tag{91}$$

où Π est le vecteur des variables duales à l'optimum du problème. Toute restructuration du secteur j correspond à un choix de la colonne B_{2j} dans S_{2j} ; celle-ci est profitable si

$$\max (-\Pi) B_{2j} \tag{92}$$

$$\text{s.c.q.} \quad B_{2j} \in S_{2j} \tag{93}$$

est positif. Supposons que tous les secteurs aient été examinés et soit $B_{2j}^{K_j+1}$ les colonnes profitables ainsi trouvées; on peut alors construire un nouveau maître problème pour continuer la procédure.

B) Prise en compte de plusieurs agents consommateurs pour la demande finale

La modification la plus importante à apporter au modèle vient certes de la prise en compte de plusieurs agents consommateurs et d'une règle de répartition du revenu. Ce besoin se présente naturellement si on veut prendre en compte l'existence de plusieurs catégories d'agents consommateurs (ce qui est l'interprétation la plus habituelle du problème), des comportements d'épargne (Ginsburgh, Erlich et Smeers [1983]) ou une contrainte de balance de payements avec fonction de demande du pays et/ou du reste du monde (Ginsburgh et Waelbroeck [1981]). On peut aussi être amené à introduire artificiellement des agents consommateurs supplémentaires pour des raisons techniques comme la modélisation d'effets d'horizon ou d'imperfections de marché, comme des rigidités de prix (Ginsburgh et Van der Heyden [1983]).

Plusieurs techniques ont été proposées qui résolvent les problèmes d'équilibre à l'aide de programmes mathématiques. Celles-ci n'ayant rien qui soit particulièrement lié à la modélisation énergétique, nous nous contenterons d'en donner un bref aperçu, renvoyant le lecteur à la littérature spécialisée.

Considérons comme exemple particulier le cas de la balance des payements. Si (u,v) désigne le vecteur des importations et exportations du pays, le système des relations de conservation de matière s'écrit

$$x + v - u + By \leq b \ . \tag{94}$$

Le modèle comporte deux agents, le pays et le reste du monde, qui maximisent leur utilité sous une contrainte budgétaire : si Π est un système de prix, la consommation x du pays satisfait

$$\max U(x) \tag{95}$$

$$\text{s.c.q.} \quad \Pi x \leq \Pi b \tag{96}$$

$$x \geq 0 \ . \tag{97}$$

De la même manière, le reste du monde choisit un vecteur (u,v) qui maximise une utilité $V(u,v)$

$$\max V(u,v) \tag{98}$$

$$\text{s.c.q.} \quad \Pi u - \Pi v \leq 0 \tag{99}$$

$$u \geq 0 \qquad v \geq 0 \ . \tag{100}$$

Enfin le système de production est en équilibre, soit

$$\Pi(b - x - v + u - By) = 0 \ . \tag{101}$$

Plusieurs méthodes recourent à la programmation mathématique permettant de résoudre ce problème. Ginsburgh et Waelbroeck [1981] proposent une approche par tâtonnement où le problème initial est remplacé par une suite de program-

mes d'optimisation

$$\max\ U(x) + \alpha\, V(u,v) \tag{102}$$

s.c.q. $$x + u - v + By \leq b \tag{103}$$

$$x,\ u,\ v,\ y \geq 0\ . \tag{104}$$

Si $(\tilde{u},\tilde{v})$ est le vecteur des imports-exports à la solution optimale, $\tilde{\Pi}$ le vecteur dual correspondant, l'algorithme de tâtonnement ajuste α à la hausse si $\Pi(\tilde{u} - \tilde{v})$ est positif et à la baisse autrement. La convergence est obtenue lorsque le solde est nul.

La méthode de Manne-Chao-Wilson [1980] considère les deux ensembles

$$\{(U,V) \mid U = U(x)\ ;\ V = V(u,v) \text{ et } x + u - v + By \leq b\} \tag{105}$$

$$\{(U',V') \mid U' = \max\,[U(x) \mid \Pi x \leq \Pi b]\ ;\ V' = \max\,[V(u,v) \mid \Pi(u-v) \leq 0\} \tag{106}$$

qu'elle essaye de séparer par un hyperplan. La méthode recourt à la génération de colonnes (Dantzig [1963]). Enfin, la méthode par successions de problèmes complémentaires linéaires considère la fonction de demande $x(\Pi)$, $u(\Pi)$ et $v(\Pi)$ solution des problèmes d'optimisation représentant le comportement des agents et pose le problème complémentaire non linéaire :

Trouver (Π,y) tel que

$$x(\Pi) + u(\Pi) - v(\Pi) + By \leq b \tag{107}$$

$$\Pi\,[b - x(\Pi) - u(\Pi) + v(\Pi) - By] = 0\ . \tag{108}$$

Ce problème est traité par une suite de programmes complémentaires linéaires.

REFERENCES

[1] Abilock, H., C. Bergström, J. Brady, A. Doernberg, A. Ek, L. Fishbone, D. Hill, M. Hirano, R. Kavanach, S. Koyama, K. Larsson, G. Leman, P. Love, M. Moy, V. Sailor, O. Sato, F. Shore, T. Sira, T. Teichmann and C.O. Wene, "MARKAL. A multiperiod linear programming model for energy systems analysis", in *Energy Systems Analysis*, R. Kavanagh (ed.), D. Reidel, 1980.

[2] Ahn, B., *Computation of Market Equilibria for Policy Analysis*, Garland, New York, 1979.

[3] Daniel, T.E., H.M., Goldberg, "Dynamic equilibrium energy modeling : the Canadian balance model", *Operations Research*, 29(5), 1981.

[4] Dantzig, G.B., *Linear Programming and Extension*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963.

[5] DOE, "The integrating model of the project independence evaluation system", U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, 1979.

[6] Ginsburgh, V., J.L. Waelbroeck, *Activity Analysis and General Equilibrium Modelling*, North-Holland, Amsterdam, 1981.

[7] Ginsburgh, V., Z. Erlich, Y. Smeers, "End effects and implicit discount rate in infinite horizon competitive equilibria, 1983.

[8] Ginsburgh, V., L. Van der Heyden, "Equilibrium with government intervention policies : the single consumer case", Centre d'Economie Mathématique et d'Econométrie, Université Libre de Bruxelles, 1983.

[9] Greenberg, H.J., F.H. Murphy, "Computing regulated market equilibria with mathematical programming".

[10] ICF, Inc., *The National Coal Model : Description and Documentation*, Washington DC., 1976.

[11] IEA, "World energy outlook", International Energy Agency, Paris, 1982.

[12] IEA ETSAP, "Energy after the eighties : a project report", à paraître en 1984.

[13] IEJE, "Le modèle MEDEE 3", Institut Economique et Juridique de l'Energie, Université des Sciences Sociales de Grenoble, Novembre 1982.

[14] Kennedy, M., "An economic model of the world oil market", *Bell Journal of Economics, Management Science*, 5(2), 1974.

[15] Manne, A.S., "ETA : a model for energy technology assessment", *Bell Journal of Economics*, 7(2), 1976.

[16] Manne, A.S., H.P. Chao, R. Wilson, "Computation of competitive equilibria by a sequence of linear programs", *Econometrica*, 48(4), 1980.

[17] Massé, P. and M. Gibrat, "Application of linear programming to investments in the electric power industry", *Management Science*, 3(2), 1957.

[18] Murphy, F.H., S. Sanders, S.H. Shaw et R. Thrasher, "Modeling natural gas regulatory proposals using the project independence evaluation system", *Operations Research*, 29, 1981.

[19] O'neill, A.P., M. Williard, B. Wilkins, R. Pike, "A mathematical programming model for allocation of natural gas", *Operations Research*, 17(5), 1979.

[20] Orchard-Hays, W., "History of mathematical programming systems", in *Design and Implementation of Optimization Software*, H. Greenberg (ed.), Sijthoff and Noordhoff, 1978.

[21] Preckel, P., "Intertemporal equilibrium models : development and results", Ph.D. Dissertation, Stanford, 1983.

[22] Shapiro, J.F., D.E. White, "A hybrid decomposition method for integrating coal supply and demand models", *Operations Research*, 30(5), 1982.

[23] Van der Voort, "The EFOM 12C energy supply model within EC modelling system. OMEGA", *The International Journal of Management Science*, 10(5), 1982.

[24] Wagner, M.H., "Supply-demand decomposition of the national coal model", *Operations Research*, 29(6), 1981.

*
* *

MARKAL-QUEBEC: UN MODELE PROSPECTIF DU SYSTEME ENERGETIQUE DU QUEBEC*

C. Berger**, G. Côté***, A. Haurie**, R. Loulou****, M. Normandin**

Résumé: Cet article présente un modèle de programmation linéaire conçu pour analyser la structure du système énergétique du Québec et son adaptation à l'évolution de la demande d'énergie utile et des prix des formes d'énergie importées. Le modèle prend en compte l'ensemble des activités du secteur énergétique depuis l'extraction et l'importation de l'énergie primaire jusqu'à l'utilisation finale de l'énergie.

La structure de MARKAL-QUEBEC est exposée et une illustration à l'aide d'un scénario 1980-2020 est fournie en annexe.

---

*Ce modèle a pu être réalisé grâce à la collaboration technique de l'Office de recherche et développement énergétiques d'Energie Mines et Ressources Canada, qui nous a permis d'avoir accès au logiciel MARKAL.

Le financement de cette recherche a été effectué grâce à des fonds du FCAC (équipe #EQ-0428, action spontanée #83-AS-0026), du CRSH (#410-81-0722-R2), du Fonds annuel de soutien (Fonds de l'Alma Mater) de l'Université de Montréal, de la Compagnie Pétrolière Impériale, et de l'IREQ.

**GERAD (Groupe d'études et de recherches en analyse des décisions), Ecole des HEC, 5255 avenue Decelles, Montréal, Québec H3T 1V6, Canada.

***I.R.E.Q., 1800 Montée Sainte-Julie, C.P. 1000, Varennes, Québec J0L 2P0.

****Faculty of Management, McGill University, 1001 Sherbrooke St. West, Montréal, Québec H3A 1G5.

1. INTRODUCTION

Cet article a pour objet de présenter le modèle MARKAL-QUEBEC qui est en cours d'élaboration en tant qu'outil d'analyse à long terme des politiques de recherche et développement dans le secteur énergétique. Ce modèle constitue une application, dans le contexte du Québec, de la méthodologie présentée par J. Boucher et Y. Smeers dans un autre article de ce numéro de la revue [3].

MARKAL-QUEBEC est un modèle de programmation linéaire multi-période dont la fonction est d'optimiser l'évolution des moyens de production, de transformation et d'utilisation des diverses formes d'énergie, de façon à satisfaire un ensemble de demandes utiles exogènes. Le programme linéaire accepte plusieurs objectifs à optimiser, faisant intervenir les dimensions économique (coût total actualisé), sécuritaire (dépendance énergétique vis-à-vis des importations), technologique (accent sur l'énergie renouvelable) et environnementale (rejets polluants). Il y a neuf périodes, de cinq années chacune, couvrant ainsi quarante-cinq années (1978-2022).

Il s'agit en fait de l'adaptation au cas du Québec d'un modèle développé sous l'égide d'un consortium de 17 pays dans le cadre de l'AIE* (le modèle MARKAL); le développement fut accompli simultanément en Allemagne fédérale (KFA**, Julich) et aux Etats-Unis (BNL***, Brookhaven). Plusieurs pays européens et nord-américains ont ensuite entrepris de construire des versions nationales ou régionales adaptées du modèle général. Nous nous sommes attachés à adapter MARKAL au Québec en utilisant pour cela le modèle développé à KFA, qui est plus compatible avec les installations informatiques locales. Pour cela, nous nous sommes partiellement inspirés de MARKAL-CANADA, développé par T. Teichmann [10] sous l'égide du ministère canadien de l'Energie, des Mines et des Ressources.

---

* Agence Internationale de l'Energie.

** Kernforschungsanlage.

*** Brookhaven National Laboratory.

Le choc pétrolier des années 70 a suscité à travers le monde un ensemble d'interrogations sur la capacité des différents pays à réorienter leur système énergétique dans une perspective où les approvisionnements en sources d'énergie fossile seraient probablement limités et, s'effectueraient de toutes les façons à un prix de plus en plus élevé du fait de l'épuisement de ces ressources. MARKAL a été conçu comme un instrument d'exploration des avenirs possibles pour le système énergétique d'une région, en mettant un accent particulier sur la description techno-économique d'un grand nombre de technologies nouvelles, de façon à pouvoir identifier celles qui seraient le plus "porteuses d'avenir". MARKAL est essentiellement un modèle de production, du type des modèles linéaires d'analyse d'activité. Pour un ensemble d'objectifs de production donnés et compte tenu d'une panoplie d'activités décrites par leurs coefficients techniques et leurs coûts, une organisation "optimale" du système de production est atteinte en utilisant la programmation linéaire. Les activités entrent ainsi en concurrence pour satisfaire un ensemble de contraintes au moindre coût.

Les objectifs de production fournis à MARKAL, sont en général exprimés en énergie utile, c'est-à-dire en besoins à satisfaire dans l'ensemble du système économique de la région considérée (température à maintenir dans les logements, chaleur industrielle, transport etc...). Compte tenu de cette évolution supposée des besoins, compte tenu aussi des prix des différentes sources d'énergie, en particulier des importations de pétrole, et compte tenu des descriptions des technologies envisageables à tous les stades du système de production (c'est-à-dire l'extraction, la transformation et l'utilisation finale de l'énergie), MARKAL détermine un agencement globalement cohérent de tout le système énergétique. C'est cette cohérence globale qui est un des attraits de ce type de modèle d'exploration d'un avenir relativement lointain. Sur un horizon d'une cinquantaine d'années, les techniques de prévision basées sur l'extrapolation de tendances n'ont plus grande validité. Des mutations profondes du système sont envisageables et MARKAL permet d'en faire une exploration.

Une version réduite de MARKAL-QUEBEC a aussi été élaborée, où les objectifs de production sont directement exprimés en demande d'énergie finale (c'est-à-dire demande de carburants, d'électricité, de gaz naturel etc...). Ce modèle, appelé MARKAL-Production, se réduit donc à la description des activités d'extraction et de transformation des sources d'énergie afin de satisfaire la demande finale; celle-ci obtenue soit au moyen d'un modèle économétrique soit au moyen d'un modèle de simulation des effets des principaux déterminants de la demande, comme MEDEE-QUEBEC décrit dans d'autres articles de ce même numéro de la revue ([4], [7], [9]). Le couplage entre un modèle d'offre de l'énergie finale et un modèle de demande peut être alors considéré et un équilibre partiel recherché. Un autre article de cette série [2] décrit cette problématique. MARKAL-production peut alors être considéré comme un modèle de planification à long terme de la production, l'horizon de cette planification étant d'une vingtaine d'années. Cette utilisation permet en particulier d'évaluer les coûts marginaux à long terme des différentes formes d'énergie.

Le présent article décrit la nature du modèle MARKAL-QUEBEC en section 2, ainsi que la composition de ce dernier (variables, objectifs, contraintes) en section 3. La section 4 précise la nature des intrants de MARKAL (banque de données). La section 5 indique les extrants du modèle et leurs utilisations possibles. Finalement l'implantation informatique de MARKAL-QUEBEC est brièvement décrite en section 6.

Une annexe contient un exemple de scénario énergétique pour le Québec fourni par MARKAL, qui permet d'illustrer l'utilisation que l'on peut faire de ce modèle.

En conclusion nous esquissons quelques développements possibles de cette méthodologie.

2. NATURE ET COMPOSITION DU MODELE MARKAL

MARKAL est un programme linéaire de grande taille constituant un modèle d'un système énergétique national (ou régional). Nous décrivons ci-dessous la nature générale d'un programme linéaire puis le Système Energétique de Référence (SER) québécois.

2.1 La programmation linéaire

Un modèle de programmation linéaire (P.L.) se compose d'une fonction-objectif (représentant une quantité que l'on veut soit maximiser soit minimiser) et d'un ensemble de contraintes (représentant des contraintes réelles que le système étudié doit satisfaire). Fonction-objectif et contraintes font intervenir des variables dont les valeurs peuvent être modifiées dans des limites prescrites, de façon à optimiser l'objectif, tout en respectant les contraintes. Un P.L. aura donc la forme générale suivante:

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{j=1}^{n} c_j \, x_j$$

$$\text{Tel que} \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \, x_j \leq b_i \qquad i=1,2,\ldots,m$$

$$d_j \leq x_j \leq e_j \qquad j=1,2,\ldots,n$$

La programmation linéaire est une technique mathématique informatisée permettant de trouver les valeurs des variables x_j qui optimisent la fonction-objectif, tout en respectant les contraintes.

L'ensemble des valeurs optimales des variables x_j est appelé la solution optimale du programme linéaire pour l'objectif choisi. Ainsi, MARKAL consiste en un modèle de programmation linéaire qui représente le Système Energétique de Référence (SER) d'un pays ou d'une région. La sous-section suivante décrit le concept de système énergétique de référence.

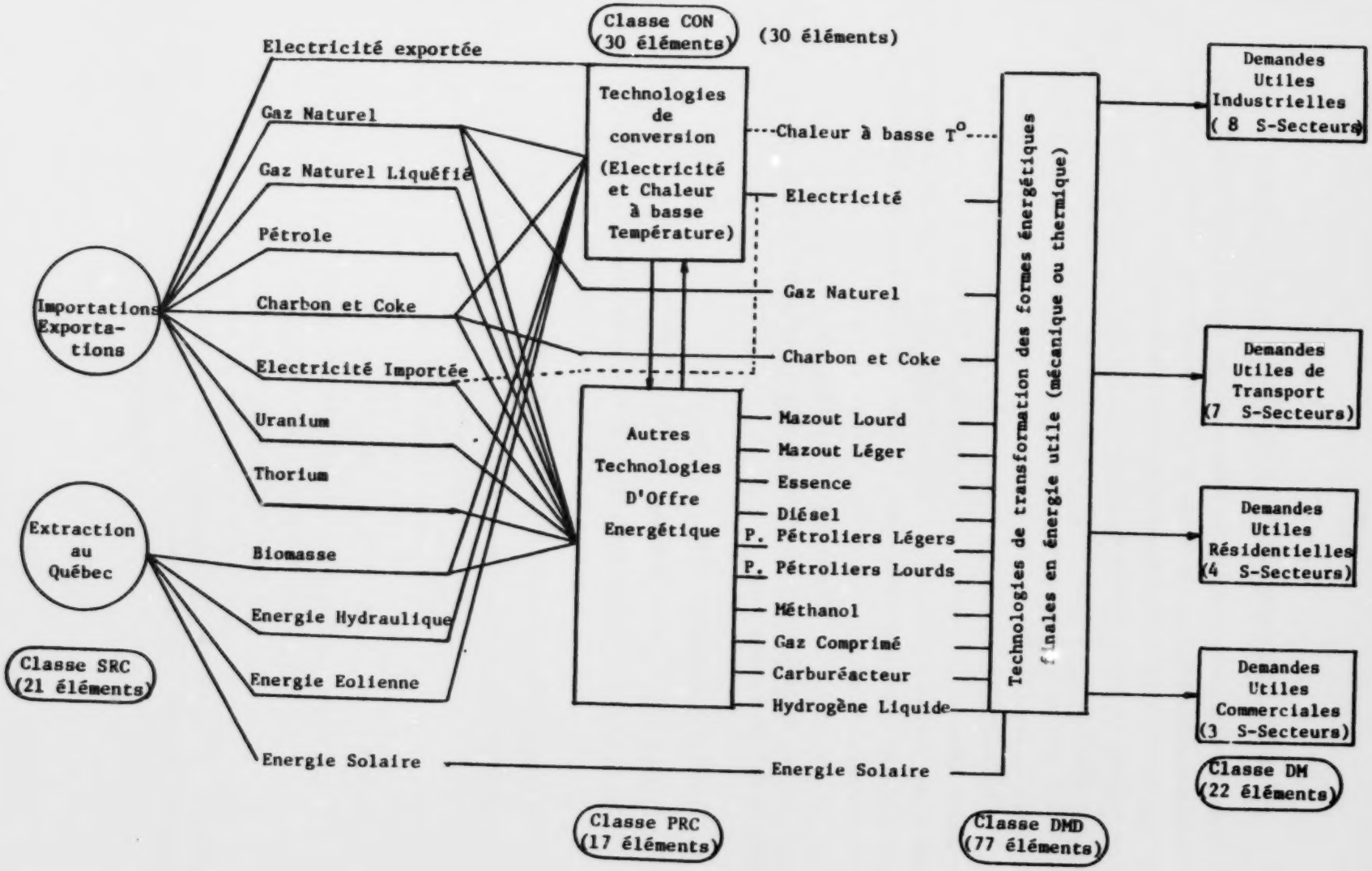


Figure 1: MARKAL-QUEBEC: Le système énergétique de référence.

2.2 Le Système Energétique de Référence (SER)

Le SER d'un pays consiste en l'ensemble des ressources énergétiques, des formes d'énergie, des processus de transformation des formes d'énergie et des technologies de consommation de ces formes d'énergie. Le SER peut être schématisé par un réseau de noeuds représentant les sources d'énergie, les processus de transformation et les technologies de consommation, reliés entre eux par des arcs orientés représentant les diverses formes d'énergie primaire ou transformée. La figure 1 est une représentation schématique du SER québécois où chacune des cinq grandes classes contient en réalité de nombreux éléments. Ces cinq classes sont celles des ressources énergétiques (SRC), des procédés de production d'électricité et de chauffage urbain (CON), des procédés de transformation (PRC), des procédés de consommation (DMD) et des demandes utiles par sous-secteur (DM).

Pour la version actuelle de MARKAL-QUEBEC, les cinq grandes classes sont constituées comme suit:

(a) Classe des ressources (SRC): 21 éléments

Pétrole brut:	Trois sources, dont deux canadiennes et une étrangère
Gaz Naturel:	Quatre sources dont trois canadiennes (1 liquide et 2 gazeux) et une étrangère (liquide)
Charbon:	Une source (canadienne ou autre)
Uranium:	Deux sources dont une d'extraction canadienne et une de réserves accumulées (stocks)
Bois:	Cinq sources d'extraction québécoise
Tourbe:	Une source d'extraction québécoise
Electricité:	Une source d'importation et quatre "sources" d'exportations. (Les exportations d'électricité sont considérées dans cette classe pour des raisons de simplification de modélisation. Elles pourraient aussi apparaître dans la classe des demandes.)

(b) Classe des procédés de conversion (CON): 30 éléments

Centrales: 20 types dont 10 hydro-électriques, 3 au charbon, 3 aux hydrocarbures, 1 éolienne, 1 solaire, 1 à tourbe, et 1 nucléaire.

Procédés décentralisés: 7 types: hydro (1), bois (1), éolienne (1), chauffage urbain (1), turbine à gaz (1), diesel (1) et pile à hydrogène (1)

Procédés de stockage: 3 types, tous 3 hydro-électriques (réserve pompée).

(c) Classe des procédés de transformation (PRC): 17 éléments

Pétrole: 2 types de raffineries, (une rigide et une flexible) (Voir remarque 2 ci-dessous)

Méthanol: 3 types de technologie de production à partir du bois (2) et de la tourbe (1)

Hydrogène: 4 procédés (électrolyse (2), gaz naturel (1), et liquéfaction (1)).

Gaz: 4 procédés de transformation

Diesel: 1 procédé, à partir de distillat léger

Nucléaire: 3 procédés (chaleur couplée, eau lourde, préparation d'uranium).

(d) Classe des demandes utiles (DM): 22 éléments

Secteur Industriel: 8 sous-secteurs: Non-métallique, primaire et construction, aliments, chimique, métallique, textiles, pâtes et papiers, autres manufactures.

Secteur des Transports: 7 sous-secteurs: maritime, rail, automobile, camion, autobus, avion, et divers.

Secteur Résidentiel: 4 sous-secteurs: chauffage des locaux (anciennes et nouvelles unités) chauffage de l'eau, et usage électro-ménager.

Secteur Commercial: 3 sous-secteurs: chauffage des locaux et de l'eau (anciens et nouveaux bâtiments) et usage électrique propre.

Secteur des Usages non-énergétiques: 2 sous-secteurs: pétrochimie (1) et autres usages (1).

(e) Classe des technologies de demande (DMD): 77 éléments

Technologies Industrielles: 25 technologies (3 par sous-secteur, voir remarque 4 ci-dessous).

Technologies Résidentielles: 20 technologies, dont 10 de chauffage résidentiel, 4 de chauffage de l'eau, 1 d'usage électrique propre et 5 de conservation.

Technologies commerciales: 13 technologies dont 8 de chauffage, 4 de conservation et 1 d'usage électrique propre (éclairage, etc...)

Technologies de transport: 17 technologies dont 6 automobiles, 2 ferroviaires, 3 de transport routier, 2 autobus, 2 avions, 1 maritime, 1 divers.

Technologies non-énergétiques: 2 technologies dont une de pétrochimie et une autre.

Quelques remarques sur la modélisation des technologies dans MARKAL

Chaque technologie représente un noeud du SER, et donc modélise la transformation d'un ou plusieurs intrants énergétiques en un ou plusieurs extrants énergétiques. Il y a plusieurs manières de modéliser cette transformation, selon le degré de précision recherché. Les quelques remarques qui suivent vont indiquer les modélisations retenues pour notre modèle, et les modifications qui devront éventuellement y être apportées pour les rendre encore plus réalistes.

Remarque 1 - Production d'électricité: l'année est subdivisée en six sections (hiver, été, intermédiaire, et jour-nuit pour chacune) ayant des durées déterminées. Une centrale électrique, dans MARKAL, produit des quantités d'énergie strictement proportionnelles à ces six durées. Il est cependant possible en utilisant certains paramètres du modèle, de spécifier une borne supérieure sur la quantité d'énergie produite par une centrale dans chaque subdivision de l'année. Malgré ces possibilités, MARKAL représente mal la possibilité de gestion des barrages (la seule exception étant les centrales à réserve pompée, qui effectuent un transfert nuit-jour d'énergie). Le lecteur trouvera en [5] une analyse plus poussée de ce problème, et des solutions à y apporter.

Ainsi, chaque technologie de conversion électrique est représentée comme à la figure 2.

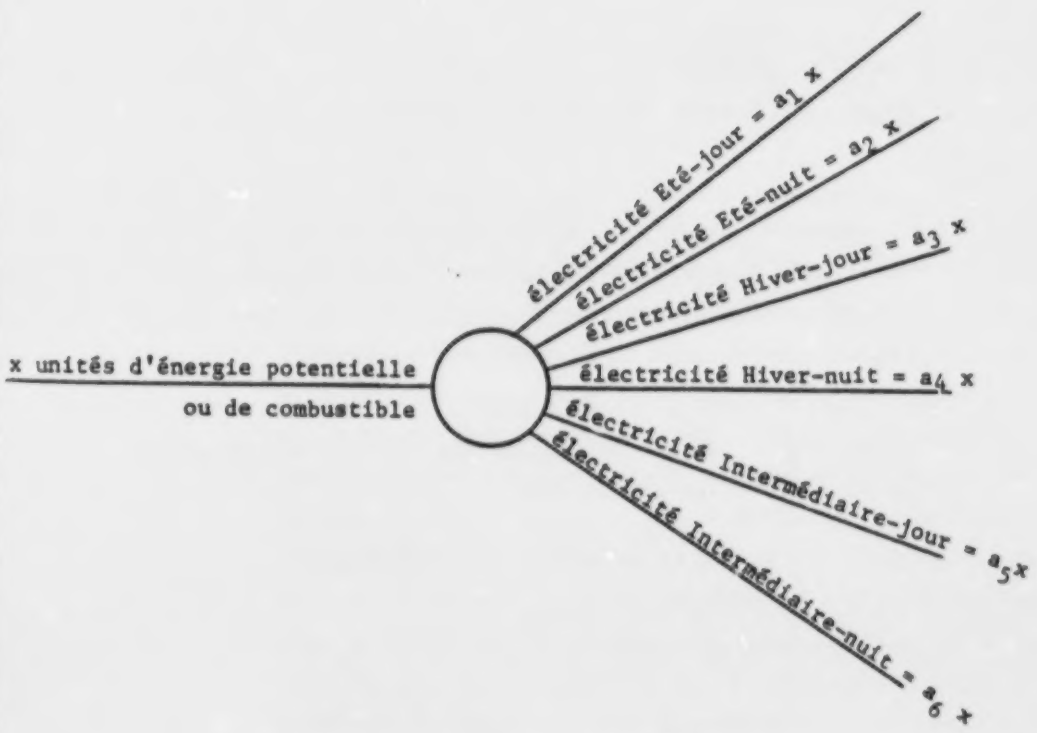


Figure 2: Représentation d'une unité de production d'électricité.

Remarque 2 - Raffineries de pétrole: 2 types de modélisation sont utilisées: noeud rigide et noeud flexible. Un noeud rigide suppose qu'une unité de pétrole brut est transformée en des produits raffinés selon des proportions strictement établies et immuables, comme l'indique la figure 3 (exemple hypothétique).

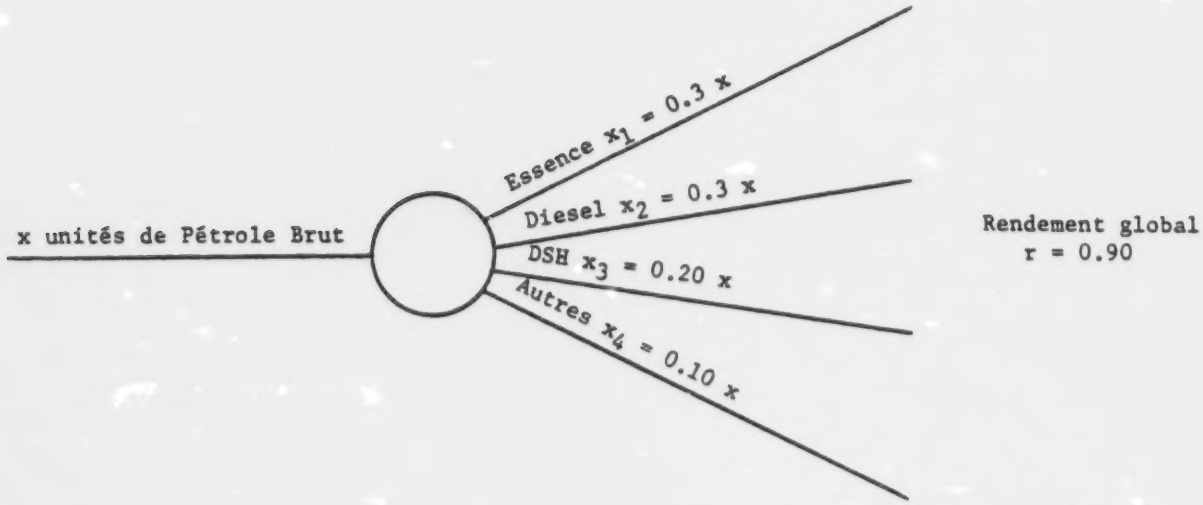
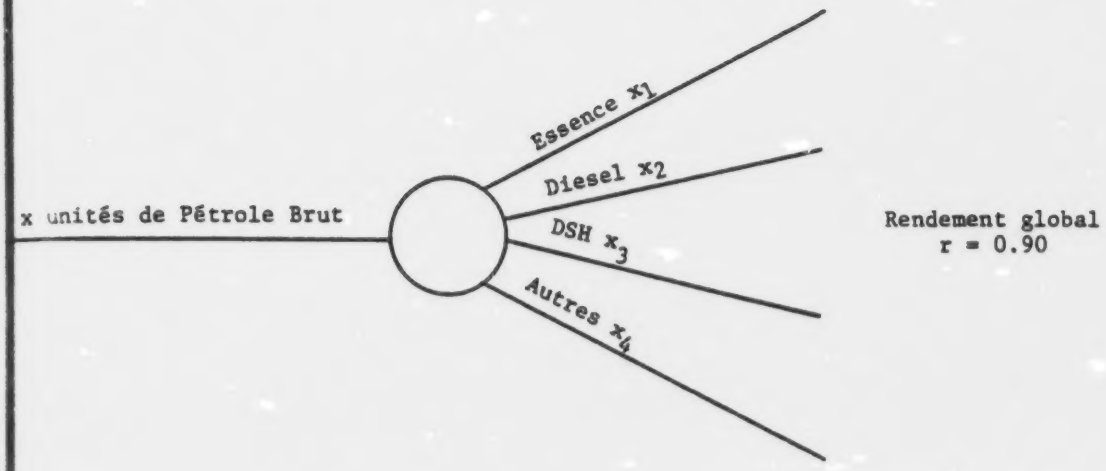


Figure 3: Exemple de raffinerie rigide

Au contraire, un noeud flexible n'impose pas de proportions fixées mais laisse à MARKAL la possibilité de choisir les proportions des divers extrants, tout en respectant des limites pré-établies et une efficacité globale.

La figure 4 donne un exemple possible où les quatre extrants x_1, x_2, x_3, x_4 seront déterminés par MARKAL, en respectant les cinq contraintes indiquées.



1 Contrainte de Rendement Global: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0.9\ x$

4 Contraintes de latitude:

$$x_1 \leq 0.4\ x$$

$$x_2 \leq 0.4\ x$$

$$x_3 \leq 0.3\ x$$

$$x_4 \leq 0.15\ x$$

Figure 4: Exemple de raffinerie flexible.

Il est clair qu'une raffinerie réelle possède certaines flexibilités et certaines rigidités dans le choix de ses produits raffinés. MARKAL, en mettant en concurrence une ou plusieurs raffineries de chaque type, peut, jusqu'à un certain point, simuler ces choix. Cependant, il paraît de plus en plus certain qu'une modélisation plus réaliste devra abandonner la méthode de la "boîte noire" pour une représentation des procédés constituant une vraie raffinerie, et devra les inclure dans le modèle MARKAL lui-même. La référence [1] propose une telle représentation dont l'implantation est en cours d'achèvement. La figure 5 en indique le principe, sans prétendre au réalisme.

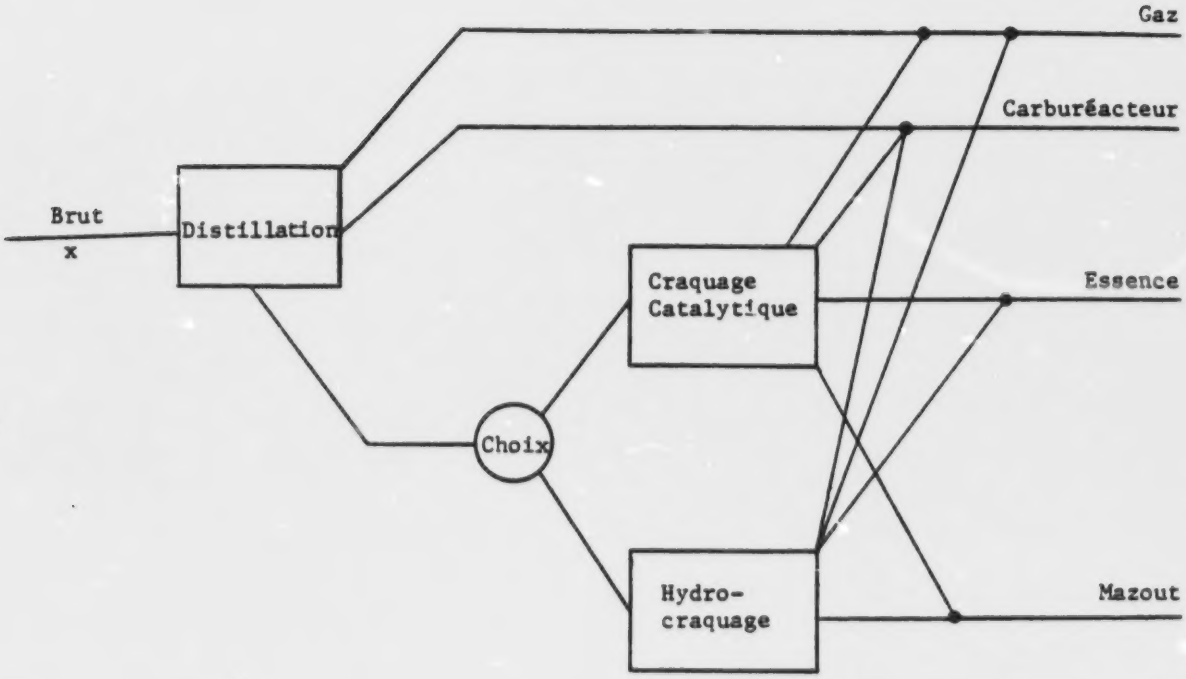


Figure 5: Principe d'une représentation de raffinerie, par procédés.

Remarque 3 - Sous-secteurs de demande (DM): Chaque sous-secteur retenu a une demande utile exogène, qui peut être satisfaite au moyen de diverses technologies (DMD) en concurrence, comme la figure 6 l'indique dans le cas du sous-secteur du chauffage de l'eau du secteur résidentiel.

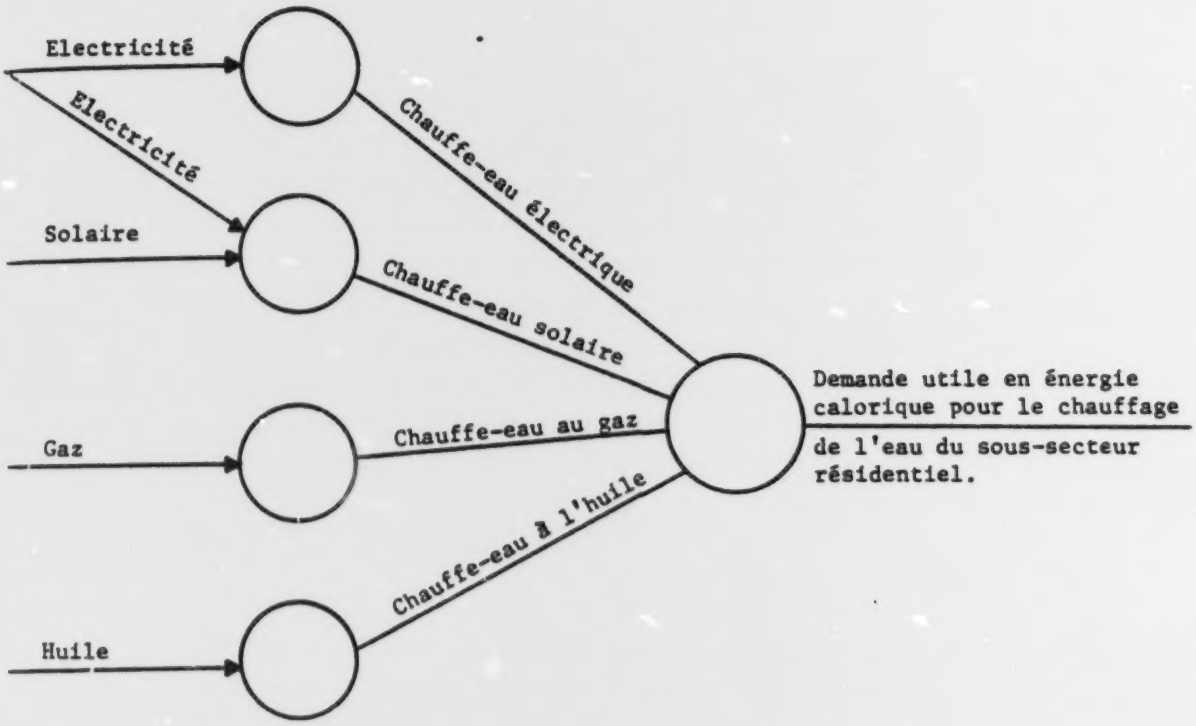


Figure 6: Concurrence des quatre types de chauffe-eau.

Cependant, le fait même de choisir les sous-secteurs peut avoir des implications, en particulier dans le domaine des transports; par exemple, le transport automobile, par autobus, et par train constituent trois sous-secteurs distincts ayant chacun leur demande utile exogène. Ceci interdit donc toute concurrence inter-modale endogène à MARKAL. Cette difficulté n'apparaît vraiment que dans le secteur des transports, mais elle est réelle et provoque des rigidités non souhaitables.

Remarque 4 - Technologies de demande (DMD): Chaque technologie de demande représente en principe un procédé réel (par exemple: fournaise à gaz, automobile diesel, sidérurgie à réduction directe, etc...) dont le ou les intrants sont en proportions fixées. De plus, chaque technique de conservation peut aussi être considérée comme une technologie de demande ayant son propre coût d'investissement, et un intrant dont le coût est nul. Cette technologie sert elle aussi à satisfaire une partie de la demande utile du sous-secteur impliqué. Ainsi MARKAL choisira une pondération de technologies et de conservation pour satisfaire une demande donnée, conformément à l'optimalité globale du critère choisi.

Dans le domaine industriel cependant, la multiplicité des procédés et le manque de données fiables nous a conduits, ainsi que la plupart des constructeurs de modèles énergétiques globaux, à adopter une représentation plus succincte des diverses industries. Pour un sous-secteur donné, trois "technologies" sont en concurrence, la technologie mixte utilisée en 1980, une seconde technologie faisant apparaître une pénétration accrue du gaz, et une troisième à pénétration accrue de l'électricité. Comme pour tous les choix technologiques de MARKAL, les durées de vie des équipements choisis constituent un volant stabilisateur qui évite les changements capricieux d'une technologie à une autre. De plus, certains freins exogènes (bornes) peuvent être définis par l'usager pour représenter les réticences et les lenteurs d'un secteur à s'engager dans les remplacements massifs d'équipement, malgré la rentabilité économique à long terme d'un tel remplacement.

Soulignons toutefois que cette représentation sera bientôt remplacée par une modélisation par procédés, du moins pour les principales industries consommatrices d'énergie au Québec.

3. LE MODELE MARKAL

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.1, un programme linéaire comporte des variables parfois appelées variables de décision, une fonction-objectif exprimant le critère à optimiser, et des contraintes devant être satisfaites. Nous allons détailler ces trois séries d'éléments dans le cas de MARKAL-QUEBEC.

3.1 Les Variables de MARKAL

Une description exhaustive des variables de MARKAL apparaît dans [6]. Ces variables peuvent être regroupées en cinq types qui sont décrits ci-dessous.

(i) La quantité, à chaque période t, de chacune des diverses formes d'énergie (primaire ou transformée) qui est extraite, produite, consommée, ou soustraite des réserves accumulées. Ces variables sont des flux sur les arcs du SER. Par exemple: la quantité annuelle de mazout léger produit durant la quatrième période (en pétajoules par an) ou l'importation d'électricité durant les jours d'hiver de la première période.

(ii) Les niveaux d'activité des divers noeuds (technologies) du SER à chaque période t. Par exemple: la production d'été d'électricité par les centrales nucléaires pour la période n° 2 (en pétajoules par an) ou bien: l'énergie utile satisfaite par les fournaises à l'huile dans le secteur commercial.

(iii) La capacité installée de chaque technologie, à chaque période. Par exemple: la capacité (en pétajoules par an) de l'ensemble des raffineries d'un certain type à la période 1. Notons que la capacité installée n'est jamais inférieure au niveau d'activité (variables (ii)) mais peut lui être supérieure.

(iv) L'augmentation à la période t de la capacité installée de chaque technologie. Ceci correspond à un nouvel investissement dans la technologie en question (PJ/an).

(v) La maintenance (réduction de capacité) prévue à la période t, pour chaque technologie de conversion. (Pour les autres technologies, la maintenance n'est pas une variable de MARKAL, mais découle simplement d'un coefficient qui vient réduire la capacité installée, voir section 3.2 ci-dessous: les contraintes d'utilisation.)

3.2 Les Contraintes de MARKAL

On peut distinguer huit grands groupes de relations:

(i) Conservation de chaque forme d'énergie à la période t: pour chaque forme, la quantité annuelle consommée (exportation + consommation pour diverses technologies + accumulation sous forme de réserves) ne doit pas excéder la quantité annuelle disponible (importation + extraction ou production secondaire + quantité soustraite des réserves). Dans le cas de l'électricité ou de la chaleur à basse température, il y a, rappelons-le, six équations de ce type, correspondant aux six sections de l'année. Schématiquement, on écrit ces contraintes comme suit (en omettant les réserves).

(1) Exportation + consommation ≤ Importation + production.

(ii) Réserves de capacité électrique pour la pointe: ces contraintes (2 contraintes par période) expriment le fait que la capacité installée devra excéder la demande de pointe par un certain pourcentage pour des raisons de fiabilité. La référence [5] contient une critique détaillée de cette manière de modéliser le phénomène de pointe électrique.

(iii) Satisfaction des demandes utiles: Dans chaque sous-secteur, et à chaque période, une contrainte indique que la somme des niveaux d'activité des technologies de demandes doit être supérieure ou égale à la demande utile (exogène) de ce sous-secteur.

(iv) Limite d'utilisation d'une technologie à la période t; cette contrainte exprime que le niveau d'activité de la technologie ne peut excéder la capacité installée (pondérée d'un coefficient de disponibilité qui prend en compte la maintenance).

(v) Transfert de capacité d'une technologie, durant les périodes 1 à t. Cette contrainte assure que la capacité à la période t n'excède pas la somme des investissements faits avant t et non encore déclassés. (Les capacités existant à la période 1 sont bien sûr prises en compte si elles ne sont pas déclassées.)

(vi) Limite supérieure à la croissance d'une technologie donnée. Cette contrainte sert à éviter des investissements massifs irréalistes qui pourraient se produire (optionnel).

(vii) Limite supérieure à la croissance annuelle des investissements totaux (optionnel).

(viii) Contraintes optionnelles: peuvent être ajoutées au modèle MARKAL, si nécessaire.

3.3 Les Fonctions-objectifs

MARKAL offre à ce chapitre plus de flexibilité que n'importe quel autre modèle du même type. Des analyses de type multi-objectif sont possibles par la simple spécification des critères, dont quelques-uns sont les suivants: le coût, la sécurité, et des fonctions environnementales.

(i) Le coût total actualisé: on minimise le coût total actualisé (investissements, opération, maintenance, importations, exportations) du système énergétique.

(ii) La sécurité: on minimise la somme pondérée de certaines formes énergétiques spécifiées par l'usager. Une utilisation fréquente consiste à minimiser les importations de pétrole brut de l'étranger, par exemple.

(iii) Les fonctions environnementales: on minimise la somme pondérée des résidus rejetés dans l'environnement.

(iv) Objectifs combinés: une particularité de MARKAL est la facilité avec laquelle on peut construire une fonction-objectif qui optimise d'abord un critère (ex: le coût), puis, s'il y a encore possibilité, optimise un second critère (ex: la sécurité). On peut ainsi obtenir des scénarios tels que PS (coûts, puis sécurité) ou SP (sécurité, puis coût) qui traduisent des priorités assez différentes du planificateur.

De plus, l'utilisateur peut choisir un objectif mixte, coût/sécurité, correspondant à une pondération des deux critères. La figure 7 ci-dessous donne une idée des résultats obtenus pour divers choix de la pondération entre coût et sécurité.

Notons que le scénario PS est toujours préférable au scénario P et que SP est toujours préférable à S. Notons aussi que le scénario R qui maximise l'utilisation de l'énergie renouvelable, n'est pas "efficace", au sens de Pareto, relativement aux critères coût et sécurité.

(v) D'autres critères d'optimisation peuvent être choisis, comme la minimisation de l'énergie d'origine nucléaire, des énergies non-renouvelables, des énergies fossiles, etc... C'est de l'utilisation successive de plusieurs critères que peuvent naître des comparaisons fructueuses.

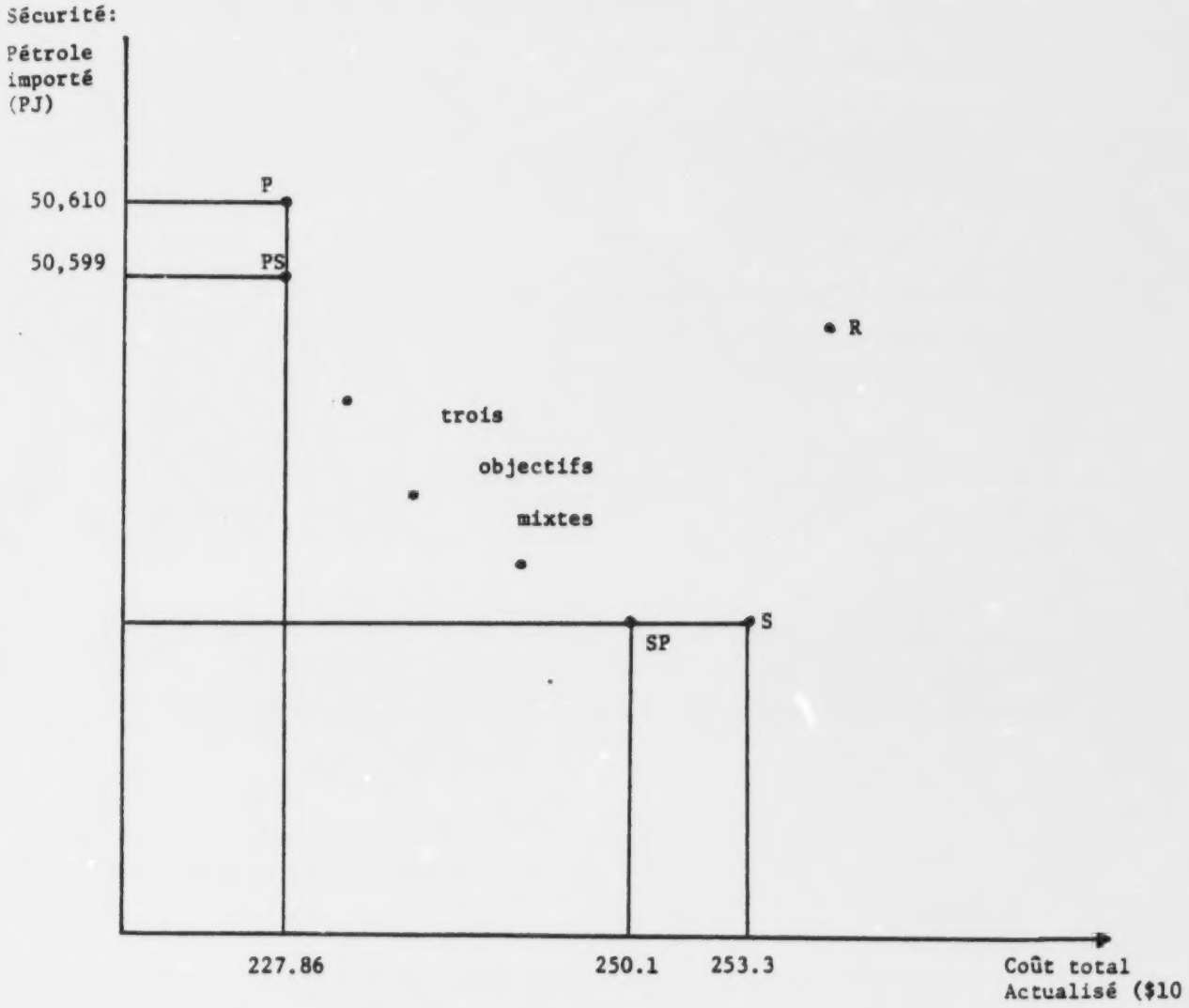


Figure 7: Les dimensions coût et sécurité:
Exemples des divers objectifs possibles.

4. LES INTRANTS DE MARKAL

La section précédente a précisé la structure du modèle MARKAL. Pour lui donner substance, il est nécessaire de préciser un certain nombre de données numériques relatives aux divers éléments du SER du pays choisi. On peut, d'une façon générale, décomposer ces données en 5 groupes.

(i) Les données technologiques: chaque technologie de production ou de transformation est décrite par la nature et la proportion relative de ses intrants et de ses extrants, comme nous l'avons décrit à la section 2.2 sur le système énergétique de référence.

D'autres données technologiques concernent la durée de vie d'un investissement dans une technologie, la date de sa disponibilité (pour les nouvelles technologies), etc...

(ii) Les données économiques: les coûts d'investissement annuels (fixes et variables) pour chaque technologie des classes PRC, CON, DMD et les prix d'achat (de vente) des combustibles importés (exportés).

(iii) Les contraintes de disponibilité sur les ressources en énergie primaire: quantités maximales disponibles à chaque période.

(iv) Les demandes utiles pour les 22 sous-secteurs de la classe DM, pour toutes les périodes.

(v) Les bornes mises sur diverses variables: comme les importations, les nouveaux investissements des diverses technologies énergétiques, ou sur les capacités installées.

Les rubriques (i) et (ii) constituent ce qu'il est convenu d'appeler la banque de données communes de MARKAL, alors que les trois autres rubriques dépendent beaucoup plus du pays d'application et des scénarios choisis. Notre groupe a effectué une révision considérable de la banque de données, de façon à la rendre plus réaliste et adaptée au Québec. Les rapports [1] et [5] décrivent quelques-uns des changements majeurs apportés à cette banque. Les demandes utiles sont fournies par des sources externes de prévision.

5. LES EXTRANTS DE MARKAL-PRODUCTION

Un programme linéaire a toujours deux types d'extrants, l'un donnant les valeurs optimales des variables du programme, l'autre donnant les valeurs des variables duales des contraintes.

(a) Valeurs des variables: elles explicitent l'état du SER à chaque période t, c'est-à-dire: les capacités installées et les niveaux d'activité des diverses technologies, les quantités produites, achetées, vendues et consommées de chaque forme d'énergie, et ceci, pour le critère choisi.

(b) Variables duales: Pour une contrainte donnée, la variable duale représente l'augmentation que subirait la fonction-objectif, si la contrainte était relaxée, d'une unité. Nous donnerons trois exemples de variables duales, à titre d'illustration:

Exemple 1: Examinons la variable duale u correspondant à la contrainte de conservation de la forme d'énergie x, à la période t. Cette contrainte s'écrit comme suit (cf. section 3.2, formule (1)) en simplifiant à l'extrême:

(1) Production nette (t) - consommation (t) ≥ 0.

Si la fonction-objectif est le coût total actualisé, u représente alors le coût additionnel nécessaire pour augmenter d'un pétajoule la disponibilité en période t. (u n'est pas nécessairement le coût marginal de la forme d'énergie x à la période t car il y a deux façons d'augmenter la disponibilité de x; soit en achetant ou produisant une unité supplémentaire de x, soit en consommant une unité de moins de x.)

Exemple 2: La fonction-objectif est la sécurité (importation de pétrole brut), et la contrainte est la même que dans l'exemple 1. La variable duale représente donc l'augmentation (ou la diminution) des importations de pétrole brut résultant d'une disponibilité accrue de la forme d'énergie x de 1 PJ en période t. (Notons qu'une variable duale peut avoir une valeur nulle.)

Exemple 3: La fonction-objectif est le coût, la contrainte est la limite d'utilisation de la raffinerie de type 1, à la période 3, qui peut s'exprimer schématiquement comme:

$$\text{Utilisation} - .8 * \text{Capacité installée} \leq 0$$

où .80 est le facteur de disponibilité.

Ici, la variable duale représente la valeur économique actualisée en période 3 d'une augmentation de 1 PJ de la capacité utilisable de cette raffinerie.

Les valeurs des variables duales sont extrêmement utiles au planificateur car elles donnent des réponses à des questions d'ordre décisionnel telles que la tarification des combustibles, les prix maximaux acceptables pour les importations, les prix minimaux acceptables pour les exportations, etc...

6. L'IMPLANTATION INFORMATIQUE DE MARKAL-QUEBEC:

MARKAL-QUEBEC est un ensemble de logiciels implantés dans l'environnement O/S 370 d'IBM. Les sous-systèmes utilisés sont: le sous-système MPSX/370 d'optimisation linéaire et le sous-système OMNI, ce dernier acquis pour la circonstance. L'utilisateur doit fournir quatre modules: le programme OMNI de génération de matrice, le programme MPSCL ou ECL (ce sont les langages de contrôle du logiciel MPSX/370) d'optimisation, le programme OMNI de génération de rapport, et la banque de données. La figure 8 indique l'articulation de ces 4 modules et des 2 sous-systèmes.

Une utilisation plus "primitive" de la programmation linéaire exigerait de l'utilisateur qu'il constitue directement la matrice du programme linéaire. MPSX imprimerait alors la solution optimale dans le format MPS standard. Au contraire, l'utilisation du sous-système OMNI permet une interaction extrêmement souple entre la banque de données et MPSX: l'utilisateur peut ainsi effectuer des changements considérables sur les données sans avoir à toucher à la programmation proprement dite. De plus, la banque de données peut être organisée de façon fonctionnelle, et le programme OMNI se chargera de la transformer en intrants standards du sous-système MPSX.

De la même façon, le programme OMNI de génération de rapport permet de construire des rapports accessibles, sélectifs, ou synthétiques, à partir de la solution de MPSX.

L'ensemble des commandes nécessaires à un passage complet peut être effectué à partir d'une console terminale en utilisant le système interactif MUSIC*, qui est essentiellement un langage de gestion de fichiers. De même, les changements à n'importe quel programme sont effectués à travers MUSIC. Une utilisation sophistiquée de MUSIC et d'autres programmes utilitaires nous permet d'effectuer un passage complet sans accéder explicitement à aucun des modules importants (et complexes) constituant le passage. Cette procédure évite les erreurs et les pertes de temps.

---

* McGill University System for Interactive Computing.

Modules
(fournis par l'utilisateur)

Résultats
Produits

Sous-Systèmes

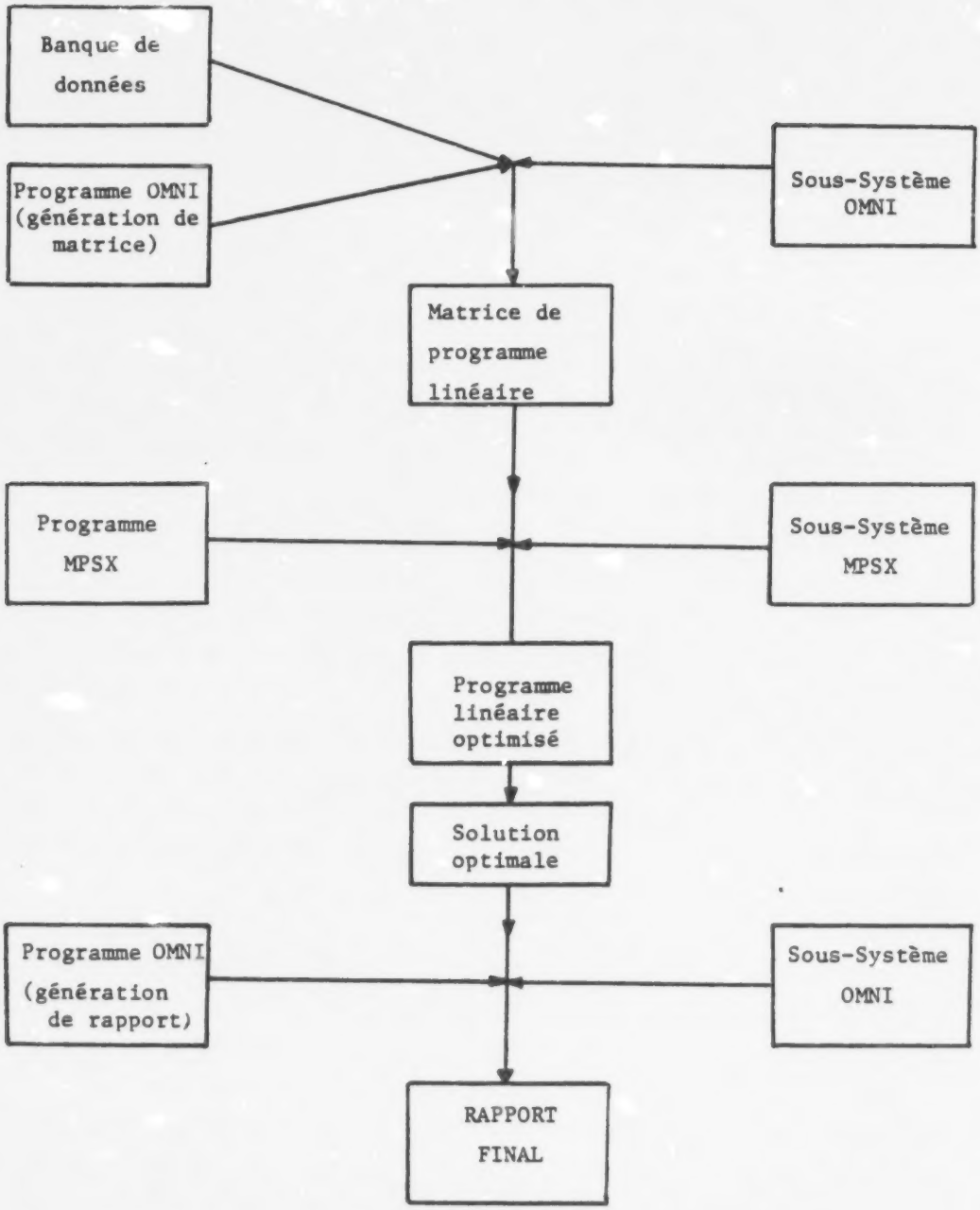


Figure 8: Schéma du logiciel MARKAL-Production.

7. CONCLUSION

MARKAL-QUEBEC a déjà atteint, dans sa version décrite ici, un niveau opérationnel qui en permet une utilisation intéressante dans le cadre d'études de prospective énergétique. Ce modèle ne prétend pas donner une prévision des besoins énergétiques du Québec, mais il fournit plutôt une méthode rationnelle d'exploration de différents avenirs possibles du système énergétique. MARKAL-QUEBEC pourra donc intervenir lors de l'élaboration de "scénarios" sur l'avenir énergétique du Québec. Il pourra servir à mesurer l'impact de l'introduction de nouvelles technologies sur l'ensemble du système énergétique. Il pourra aussi servir à suggérer aux gouvernements et aux autres grands décideurs dans quelles directions orienter des politiques d'incitation ou de taxation, afin de favoriser les actions individuelles qui profiteront au Québec dans son ensemble. Mais le rôle de MARKAL n'est pas forcément limité à cela.

Dans sa version réduite, MARKAL-Production, le modèle pourra être intégré à une méthodologie de recherche d'un équilibre partiel entre les secteurs de l'offre et de la demande d'énergie. Cette application, présentée en termes généraux dans l'article de J. Boucher et Y. Smeers [3], est en voie de réalisation. Un des articles de ce numéro de la revue [2] porte spécifiquement sur cette implantation.

D'autres développements de MARKAL-QUEBEC sont prévus à moyen terme. Une meilleure description du secteur industriel fournira plus de renseignements sur les substitutions énergétiques et technologiques dans ce secteur. Une meilleure description des processus de raffinage permettra de mieux évaluer les rigidités dans la production de distillats légers et lourds et leur impact sur les prix des différents produits raffinés. Le prolongement de la modélisation MARKAL au niveau de l'ensemble du Canada va être envisagé à partir d'une modélisation régionalisée où plusieurs modèles MARKAL seront interconnectés. Une telle modélisation fournira un précieux instrument d'analyse des avantages liés à la coopération énergétique entre les régions.

Le fait que MARKAL soit utilisé par plusieurs autres pays de l'AIE va aussi permettre d'envisager une modélisation des échanges énergétiques internationaux.

REFERENCES

[1] C. BERGER, "Le secteur des raffineries de pétrole dans MARKAL", Cahier du GERAD, no: G-83-11, mai 1983.

[2] C. BERGER, A. HAURIE, P. MARCOTTE, G. LAFRANCE et J.P. SURPRENANT, "Vers un couplage entre MEDEE et MARKAL basé sur la recherche d'un équilibre partiel réglementé", l'Actualité Economique (ce numéro).

[3] J. BOUCHER et Y. SMEERS, "Programmation mathématique et modélisation énergétique", l'Actualité Economique (ce numéro).

[4] R. CORBEIL, "Le transport dans MEDEE-3 QUEBEC", l'Actualité Economique (ce numéro).

[5] G. COTE, "Le secteur électrique dans MARKAL; présentation et commentaires", Cahier du GERAD, no: G-82-14, octobre 1982.

[6] L.G. FISHBONE et H. ABILOCK, "MARKAL, A Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis", Energy Research, Vol. 5, 1981, 353-375.

[7] G. LAFRANCE et J.P. SURPRENANT, "Le secteur industriel dans MEDEE-3 Québec", l'Actualité Economique (ce numéro).

[8] G. LAFRANCE et J.P. SURPRENANT, "Les secteurs résidentiel et commercial dans MEDEE-3 Québec", l'Actualité Economique (ce numéro).

[9] J.P. PELLEGRIN, "Un outil d'analyse de la demande énergétique à long terme: La méthode MEDEE et son application au cas du Québec", l'Actualité Economique (ce numéro).

[10] T. TEICHMANN, "Canadian Energy System Supply and Demand Sensitivity Studies", 3 volumes, rapport préparé pour EMR Canada, mars 1981.

ANNEXE: EXEMPLE DE SCENARIOS ENERGETIQUES OBTENUS A L'AIDE DE MARKAL.

Afin d'illustrer les possibilités d'analyse offertes par MARKAL-QUEBEC nous allons rapidement survoler deux scénarios énergétiques pour le Québec, en commentant les résultats les plus significatifs.

Dans une première section nous indiquerons les hypothèses retenues pour fournir les intrants principaux de MARKAL. Dans la section suivante nous commenterons les évolutions d'un certain nombre d'indicateurs typiques parmi ceux fournis par MARKAL.

A.1.1 Le choix des intrants conditionnant les scénarios étudiés.

En nous reportant à la section 4, nous voyons que les intrants de MARKAL sont constitués de données technologiques et économiques, de contraintes de disponibilité et de bornes imposées à certaines variables. Une présentation complète de tous ces paramètres nécessiterait beaucoup trop d'espace pour être donnée ici.

Nous n'entrerons donc pas dans le détail des données technologiques, ni dans celui des données économiques relatives aux coûts des technologies. Soulignons cependant que, en ce qui concerne les centrales hydro-électriques, la description a été

faite à partir de projets typiques d'Hydro-Québec.

Dans cette section nous nous bornerons donc à décrire le contexte d'évolution des prix du pétrole et des autres énergies primaires fossiles et le contexte d'évolution de la demande utile que nous avons retenus pour bâtir ces scénarios, sans toutefois représenter l'évaluation officielle des coûts de ces projets par l'entreprise.

A.1.1.1 Les hypothèses d'évolution des prix du pétrole, du gaz et du charbon

Nous présenterons dans cette annexe deux scénarios, l'un appelé scénario O, pour optimiste, l'autre appelé scénario P, pour pessimiste, tous deux schématisés sur les figures A1, a) et b).

Le scénario O correspond à une hypothèse de faible croissance des prix du pétrole. Le prix du pétrole étranger décroît légèrement (en dollars constants) jusqu'en 1985 et croît ensuite pour atteindre en 2020 un prix de 50% supérieur au prix de 1980. Le prix du pétrole canadien rejoint le prix mondial en 2000. Le prix du gaz naturel est à 75% du prix du pétrole en 2000 et atteint 90% de ce prix en 2010 et 2020.

Le scénario P correspond à une hypothèse de plus forte croissance des prix du pétrole. Le prix du pétrole étranger augmente de près de 130% sur la période de 40 ans considérée. Le

prix du pétrole canadien rejoint le prix mondial en 2010. Le prix du gaz naturel subit aussi une forte hausse. Le prix du charbon, par contre ne subit pas une hausse plus forte que dans le cas O.

Ces deux perspectives correspondent donc à deux types d'évolution assez contrastées du prix des hydrocarbures. Notons bien qu'il ne s'agit pas ici d'une prévision de l'évolution du marché mondial du pétrole, mais seulement d'hypothèses. Comme le prix du charbon évolue de la même façon dans les deux cas, le scénario P devrait rendre cette forme d'énergie primaire beaucoup plus attrayante.

A.1.1.2 Les hypothèses d'évolution de la demande utile

La prévision des besoins énergétiques au Québec et au Canada a déjà été faite par plusieurs organismes ou compagnies.

Ces organismes fournissent des prévisions en énergie finale; c'est-a-dire qu'ils incluent dans leur méthodologie de prévision des hypothèses de choix technologiques (substitutions interénergétiques) et d'économies d'énergie pour chacun des secteurs. Dans MARKAL les choix technologiques sont endogènes et ce sont eux qui dictent les économies d'énergie (conservation). Il nous a donc fallu rétablir, en partant des prévisions de demande finale produites par ces organismes, les demandes utiles, c'est-à-dire l'expression des besoins de consommation et de

production qui vont occasionner la consommation des différentes formes d'énergie.

Comme MARKAL utilise un horizon de neuf périodes de cinq ans, il a fallu aussi prolonger ces prévisions, qui en général ne dépassaient pas un horizon de vingt ans. Ces prolongements ont souvent été faits par une extrapolation linéaire. Il s'agit donc, plutôt que de prévisions, d'hypothèses de croissance des activités économiques associées à ces besoins.

Les deux scénarios étudiés diffèrent, au niveau des hypothèses sur la demande, seulement dans la demande utile du secteur industriel. A l'hypothèse de forte croissance des prix pétroliers est associée une plus faible croissance de la demande utile industrielle.

Les figures A2 a) et b) résument les hypothèses de croissance de la demande d'énergie utile dans le secteur industriel. La figure 2a) correspondant au scénario O, est obtenue à partir d'une "transformation" de la méthode de prévisions d'Hydro Québec [A2]. En effet nous devons éliminer les économies d'énergie et exprimer tous les besoins à partir de la technologie la moins efficace. (Rappelons que MARKAL se chargera d'introduire des technologies efficaces pour optimiser le système.) La figure 2b) indique des hypothèses de croissance plus faibles dans le secteur industriel correspondant au scénario P. La demande utile du secteur industriel, dans le scénario P, a été

diminuée de plus de 25% en 2020, par rapport au scénario "0".

La figure A3 décrit l'hypothèse de croissance de la demande utile dans le secteur résidentiel. Ce secteur est décomposé en quatre sous-secteurs (chauffage des anciens logements, chauffage des nouveaux logements, chauffage de l'eau et électricité spécifique). Le nombre de logements a été établi à partir de projections démographiques de Statistique Canada [A8], prolongées jusqu'à 2020 suivant un taux de croissance de 0,34%. Les proportions de logements individuels et collectifs, les taux de désaffectation et les consommations annuelles moyennes pour le chauffage, par type de logement, proviennent d'une étude de l'INRS-Energie [A3]. Rappelons ici que, selon la convention retenue dans les modèles MARKAL pour le Canada et pour le Québec, la demande utile est exprimée en unités énergétiques (PJ) en utilisant la technologie la moins efficace (ici le chauffage au bois avec un rendement de 40%). Une approche similaire a donné une évolution de la demande utile pour le chauffage de l'eau et, finalement la demande d'électricité spécifique (cuisson, éclairage et électro-ménager) a été fixée à 11,5% de la demande globale d'énergie du secteur résidentiel, selon les observations de Cao [A1].

La figure A4 décrit l'hypothèse de croissance de la demande utile dans le secteur commercial. La démarche suivie pour définir cette évolution est assez similaire à la précédente, si ce n'est que nous sommes partis de prévisions d'Hydro-Québec,

extrapolées jusqu'en 2020. Selon Cao [A1], 30% de la demande totale se rattache à l'électricité spécifique, et ce pourcentage a été conservé sur tout l'horizon de temps considéré.

La figure A5 décrit l'hypothèse d'évolution de la demande dans le secteur des transports. Au moment de l'élaboration de ce scénario, l'analyse qui nous est apparue la plus complète pour ce secteur était celle de l'INRS-énergie [A5]. Les prévisions données dans [A5] ont cependant été ajustées pour les exprimer en énergie utile, avant application des économies d'énergie et des substitutions interénergétiques. Une modification des prévisions de [A5] concernant le secteur des transports aériens a été effectuée aussi pour tenir compte du marasme des dernières années dans ce secteur. Les prévisions ont été extrapolées linéairement jusqu'en 2020.

L'ensemble de ces hypothèses d'évolution de la demande utile a été construit en retenant ce qui nous a paru le plus raisonnable dans un groupe d'analyses faites par divers organismes. Lorsque MEDEE-3-QUEBEC aura été implanté, il sera éventuellement possible de disposer d'une source unique pour évaluer les besoins énergétiques au Québec jusqu'en 2006 en terme d'énergie utile.

Une difficulté méthodologique demeurera cependant dans l'utilisation de l'approche MEDEE pour évaluer la demande utile. En effet les concepteurs de MEDEE font dépendre la demande utile

du type de technologie utilisée pour la satisfaire (la disposition d'automobile engendre un besoin de déplacement, etc...)

Cet ensemble d'hypothèses illustre cependant bien ce que peut fournir MARKAL-QUEBEC. Au lieu d'être un exercice de scénarisation unique, MARKAL permet à l'analyste de modifier à son gré les hypothèses de demande, de prix etc... pour observer la façon dont l'ensemble du système d'offre s'ajuste à des conditions nouvelles.

En bref, si ces hypothèses d'évolution de la demande utile nous paraissent raisonnables, elles ne sont pas vraiment des prévisions, mais plutôt des spécifications d'un environnement économique qui pourrait déterminer les besoins énergétiques du Québec. Le soin porté à la construction de ces hypothèses sera évidemment déterminant pour assurer la validité des résultats fournis par MARKAL. Notre propos n'étant ici que d'illustrer le type de résultats que peut fournir un exercice MARKAL nous n'approfondirons pas cet aspect de la scénarisation. Ces spécifications vont cependant nous permettre de construire deux images du système énergétique du Québec sur un horizon de 45 ans, correspondant à deux situations assez contrastées.

Avant de clore cette section nous mettons en garde le lecteur contre toute interprétation abusive des valeurs énergétiques utilisées pour exprimer les demandes utiles. En effet, selon le sous-secteur considéré le mode de calcul peut

changer puisque, par convention, il dépend de l'efficacité de la technologie d'usage la moins efficace. Ces demandes sont l'élément directeur de MARKAL, elles traduisent une croissance supposée des besoins. Afin de mieux présenter ces hypothèses, indépendamment de toute unité énergétique nous fournissons en table A1 une description de l'évolution supposée de toutes les demandes utiles, sous la forme d'indices, partant tous de la base 100 en 1980.

A.1.2 Grande lignes du scénario 0

Nous présenterons le scénario 0 en remontant la chaîne énergétique du SER depuis les sources d'énergie primaire jusqu'à la satisfaction des demandes utiles. Ici aussi l'abondance des résultats fournis par MARKAL nous entraînerait trop loin si nous ne faisions pas une sélection des faits les plus marquants.

La figure A6a) indique l'évolution des consommations d'énergie primaire au Québec, suivant le scénario 0. Le fait marquant sur cette figure est la forte décroissance de la consommation de pétrole et son remplacement par le gaz naturel et l'électricité comme source d'énergie au Québec. Le bois progresse aussi sensiblement et le charbon reste constant. Remarquons aussi que la recherche du coût minimum pour l'ensemble du SER introduit un déclin de la consommation primaire totale jusqu'en 1990, suivi d'une reprise (augmentation de 25% sur 30 ans).

La figure A7a) indique la répartition de la demande d'énergie finale pour les différentes formes disponibles. Au niveau des utilisateurs, les produits pétroliers qui constituaient près de 70% du bilan en 1980, ne représenteront plus que 35% en 2020. L'électricité passera de 25% à près de 40%; le gaz naturel, de 7% à près de 20%; le bois, l'hydrogène et, de façon timide, le méthanol arrivent à représenter 5% du bilan final en 2020.

Cette croissance de la part de l'électricité nécessite un accroissement sensible de la puissance installée. La figure A8a) montre que ce sont les centrales hydro-électriques qui fournissent le gros de cette puissance. L'équipement de pointe ou de réserve est surtout constitué de turbines à gaz et de centrales à réserve pompée. Les éoliennes apparaissent timidement du fait des bornes imposées qui limitent la pénétration de cette technologie (limitations des sites).

La figure A9a) indique la production prévue pour chaque type d'équipement. L'équipement de pointe ou de réserve n'intervient pas dans cette production car il sert essentiellement à assurer la sécurité de l'approvisionnement. Cette figure indique à quel moment les nouveaux équipements devront être opérationnels. Les grands projets hydroélectriques de base sont d'abord réalisés, suivis des petites centrales hydrauliques décentralisées qui apparaissent en 2015.

L'électricité produite est utilisée par les différents

secteurs de demande suivant une progression illustrée en figure A10a). On remarquera une percée de l'électricité dans le secteur des transports. Dans les autres secteurs, l'électrification se fait sensiblement au même rythme (doublement de la demande sur 40 ans).

La demande d'électricité dans le secteur des transports est principalement dûe à l'évolution du parc automobile, illustrée en figure A11a). La voiture à essence qui constitue 100% du parc en 1980 disparaît totalement en 2015 après une chute vertigineuse qui débute en 1995. Elle est remplacée par la voiture au gaz naturel et la voiture électrique, puis timidement, à partir de 2010, par la voiture au méthanol. En 2020 le parc automobile est presqu'également réparti entre les voitures au gaz naturel et les voitures électriques.

Signalons aussi que dans le secteur résidentiel, les nouveaux logements ne sont chauffés qu'à l'électricité et au bois; dans le secteur commercial les nouveaux édifices commerciaux ne sont chauffés qu'à l'électricité et à l'aide de pompes à chaleur. Les tables A2 et A3 résument ces informations.

En bref nous voyons que malgré la faible hausse anticipée du prix du pétrole, MARKAL-QUEBEC effectue une substitution inter-énergétique massive, principalement en faveur de l'électricité. Le gaz naturel paraît peu attrayant pour le chauffage domestique ou commercial (nouveau stock).

Cette très forte pénétration du bois peut être due à un effet pervers de la programmation linéaire. Une modélisation plus poussée pourrait faire apparaître une structure de coût non linéaire pour ce type de chauffage et en limiter l'utilisation.

A.1.3 Passage au scénario P

Nous considérons le scénario P en comparaison avec le scénario 0, c'est pourquoi les figures correspondant aux deux scénarios sont données en parallèle. La figure A6b) indique donc l'évolution des consommations d'énergie primaire au Québec, suivant le scénario P. Nous constatons que la chute dans la consommation d'énergie primaire est nettement plus accentuée, le minimum étant atteint en 1995. Le pétrole et le gaz sont nettement moins consommés (20% de différence) avec le scénario 0 en 2020, cependant que la consommation primaire d'électricité augmente de 7% (964 PJ en 2020 contre 904 PJ en 2020 pour le scénario 0). L'utilisation du bois double presque (138 PJ au lieu de 75 PJ en 2020).

Au niveau de l'énergie finale, l'évolution indiquée par la figure A7b) montre que la part des produits pétroliers tombe à moins de 30% en 2020. Le gaz naturel ne dépassera pas 12% du total énergétique en 2020, l'électricité sera passée à 42%, le méthanol à plus de 3%, le bois à plus de 3% et, élément vraiment nouveau, l'hydrogène représente plus de 8% du total. Hydrogène,

méthanol et bois représentent ainsi plus de 15% du bilan final. L'hydrogène est produit par électrolyse. La hausse de consommation d'électricité associée à la demande d'hydrogène implique donc un programme d'investissement un peu plus intense dans le secteur électrique, tel qu'indiqué sur la figure A8b).

La figure A9b) indique les types d'équipement produisant l'électricité demandée. Nous constatons que l'équipement est somme toute assez similaire à celui du scénario O.

La demande finale d'électricité aura diminué par rapport au Scénario O, surtout dans le secteur industriel, puisque dans ce scénario la demande utile dans ce secteur est basse. Notons que l'électricité utilisée pour produire de l'hydrogène n'est pas comptabilisée comme énergie finale mais plutôt au niveau de l'énergie primaire. Dans les secteurs commercial et résidentiel il n'y a pas d'importantes différences dans la pénétration totale de l'électricité entre les scénarios O et F.

La composition du parc automobile montre que la voiture au méthanol et la voiture électrique occupent une place très importante à la fin de l'horizon. La voiture au gaz naturel aura assuré la transition entre la voiture à essence et ces nouveaux types de véhicules.

L'hydrogène est surtout utilisé dans le transport par camions et par autobus et de façon modérée sous forme d'additif au

gaz naturel, dans le chauffage résidentiel et commercial (ancien stock) de même que dans le secteur industriel.

Les choix technologiques dans les secteurs résidentiel et commercial (nouveaux stocks) restent pratiquement inchangés dans les deux scénarios.

En bref l'élément nouveau de ce scénario est la pénétration nettement accrue de l'hydrogène, qui est produit par électrolyse et qui fournit 136 PJ d'énergie finale en 2020.

Il est intéressant de voir que la chute de consommation d'électricité due à la faible hypothèse de croissance de la demande utile dans le secteur industriel est plus que compensée par la demande d'électricité en vue de la production d'hydrogène.

TABLEAU A1

Evolution de la demande utile par secteur

1980 = 100

INDUSTRIEL (Scénario "0")

	1980	1990	2000	2010	2020
Minéraux non métalliques	100	130.37	181.53	218.55	264.06
Primaires et construction	100	130.06	180.91	218.40	264.62
Aliments et boissons	100	139.39	190.70	234.14	284.44
Produits chimiques	100	126.40	170.66	201.50	239.92
Autres industries	100	132.13	185.39	224.50	272.58
Métaux primaires	100	134.91	195.46	239.81	294.59
Textiles	100	134.61	180.67	218.26	262.20
Pâtes et papiers	100	132.84	181.12	220.51	266.81

INDUSTRIEL (Scénario "P")

	1980	1990	2000	2010	2020
Minéraux non métalliques	100	113.61	145.21	161.93	188.60
Primaires et construction	100	113.09	144.73	164.83	189.02
Aliments et boissons	100	121.22	152.55	176.70	203.16
Produits chimiques	100	109.91	136.53	152.08	171.38
Autres industries	100	114.90	148.31	169.43	194.70
Métaux primaires	100	116.59	156.37	180.99	210.42
Textiles	100	117.05	144.52	164.71	187.28
Pâtes et papiers	100	115.51	144.94	166.42	190.58

TRANSPORTS (Scénarios "0" et "P")

	1980	1990	2000	2010	2020
Train	100	141.80	218.61	265.95	323.95
Auto	100	108.37	116.85	125.30	133.65
Camion	100	111.37	123.12	134.63	146.26
Autobus	100	155.41	226.96	285.47	348.62
Avion	100	139.87	197.86	267.71	334.44
Bateau	100	115.08	133.49	149.51	166.38
Autres	100	99.18	99.08	99.08	99.08

RESIDENTIEL (Scénarios "0" et "P")

	1980	1990	2000	2010	2020
Chauffage (Logements anciens et nouveaux)	100	118.81	126.49	130.98	135.64
Chauffage de l'eau	100	113.06	118.32	122.49	126.78
Electricité spécifique	100	137.25	205.82	254.00	308.26

COMMERCIAL (Scénarios "0" et "P")

	1980	1990	2000	2010	2020
Chauffage (Edifices anciens et nouveaux)	100	123.28	150.48	176.58	202.15
Electricité spécifique	100	123.33	150.56	176.67	202.22

TABLEAU A2

Répartition des systèmes de chauffage des nouveaux édifices commerciaux et institutionnels

(Pourcentage)

Année	Electricité	Pompe à Chaleur
1985	100.0	0.0
1990	100.0	0.0
1995	60.9	39.1
2000	50.2	49.8
2005	39.7	60.3
2010	32.7	67.3
2015	27.9	72.1
2020	14.8	85.2

TABLEAU A3

Répartition des systèmes de chauffage des nouveaux logements

(Pourcentage)

Année	Bois	Electricité
1985	0.0	100.0
1990	0.0	100.0
1995	19.0	81.0
2000	24.5	75.5
2005	29.2	70.8
2010	33.7	66.3
2015	37.9	62.1
2020	41.9	58.1

SOURCES UTILISEES

[A1]- M. Cao, "Les potentialités de substitution interénergétique du Québec", D.G.A., septembre 1981, document de travail présenté dans le cadre du projet MEDEE-Québec.

[A2]- Hydro-Québec, "Prévision de la demande d'électricité entre 1982 et 1998", Dossier 82.01, janvier 1982.

[A3]- G. Lafrance, J.P. Surprenant, K. Parbhakar, "Le système urbain", INRS-E:140, mai 1982.

[A4]- Office national de l'énergie, "L'énergie au Canada: offre et demande, 1980-2000", juin 1981.

[A5]- K. Parbhakar, G. Lafrance, J.P. Surprenant, "Le système des transports". INRS-E 139. mars 1982.

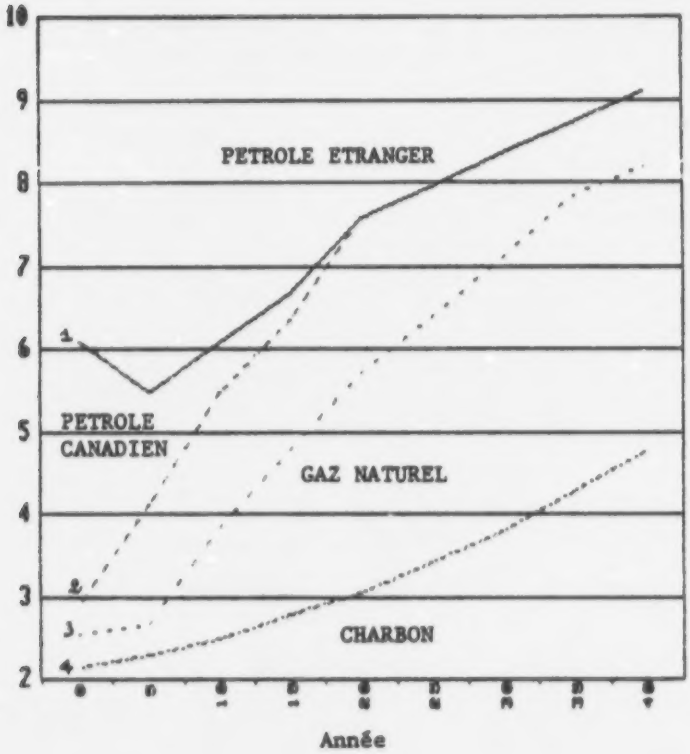
[A6]- Statistique Canada, "Bulletin trimestriel - disponibilité et écoulement d'énergie au Canada", Catalogue 57-003, 1980 - IV.

[A7]- Statistique Canada, "L'équipement ménager", Catalogue 64-202, 1983.

[A8]- Statistique Canada, "Projections démographiques pour le Canada et les provinces 1976-2001, Catalogue 91-520.

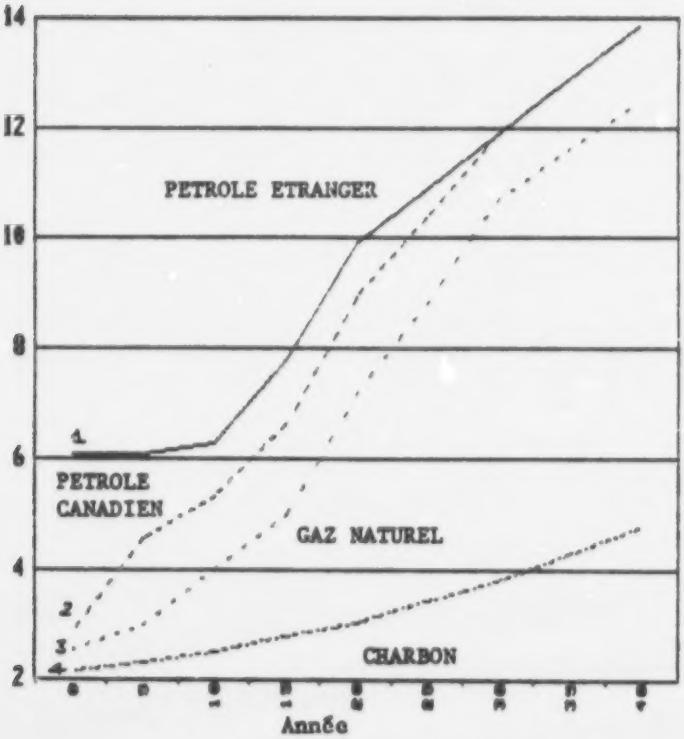
[A9]- Statistique Canada, "Projections de ménages et des familles pour le Canada et les provinces jusqu'en 2001", Catalogue 91-417.

Figure A1: PRIX DES FORMES D'ENERGIE IMPORTEES ($80/GJ)



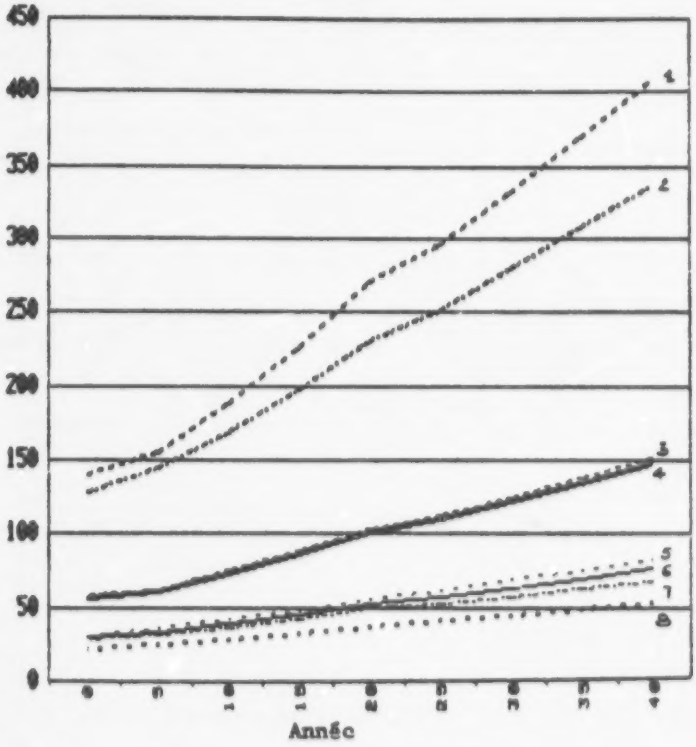
a) Scénario "0"

1: Pétrole étranger
2: Pétrole canadien
3: Gaz naturel
4: Charbon

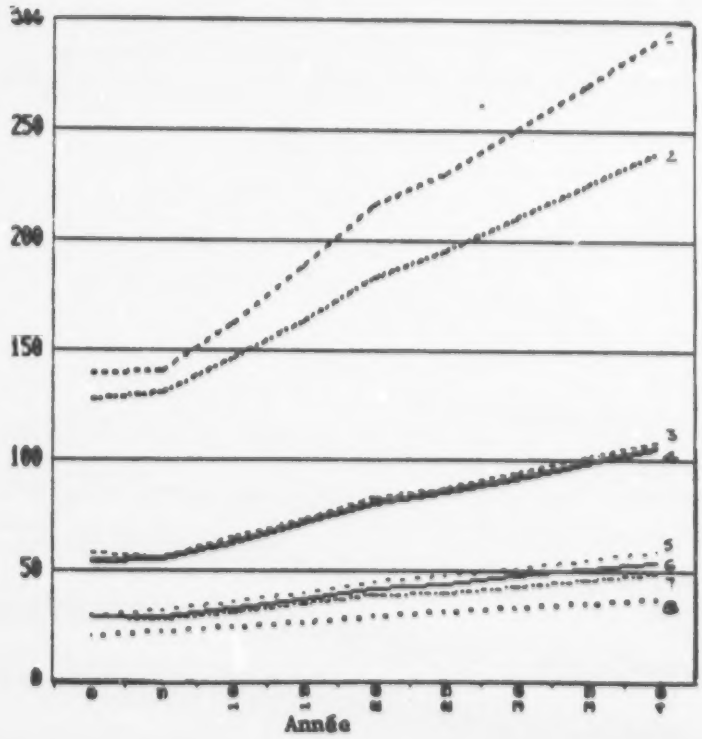


b) Scénario "P"

Figure A2: DEMANDE UTILE EN PETAJOULES DU SECTEUR INDUSTRIEL (PAR SOUS-SECTEUR)



a) Scénario "0"

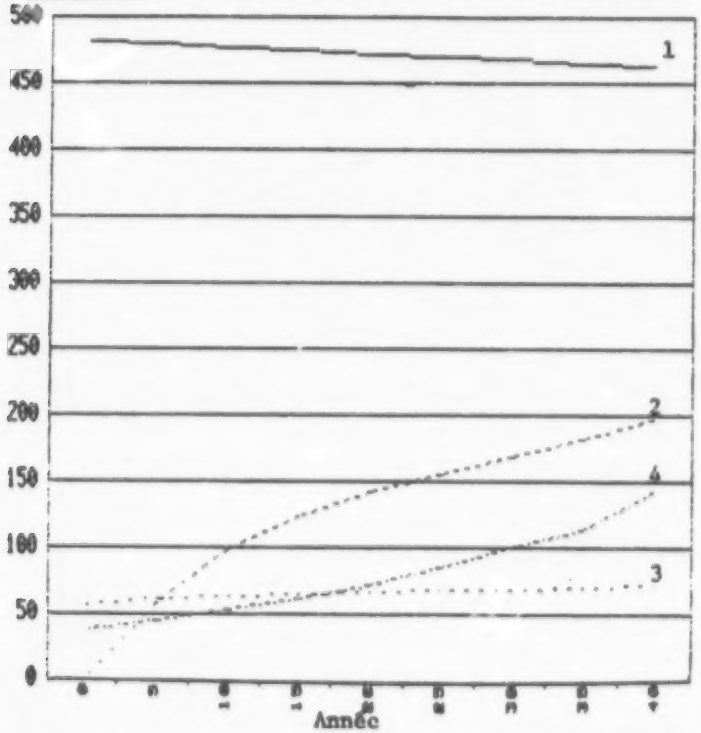


b) Scénario "P"

Demande Utile
Légende:

1: Métaux primaires
2: Pâtes et papiers
3: Primaire et construction
4: Autres industries manufacturières
5: Aliments et boissons
6: Minéraux non-métalliques
7: Produits chimiques
8: Textiles

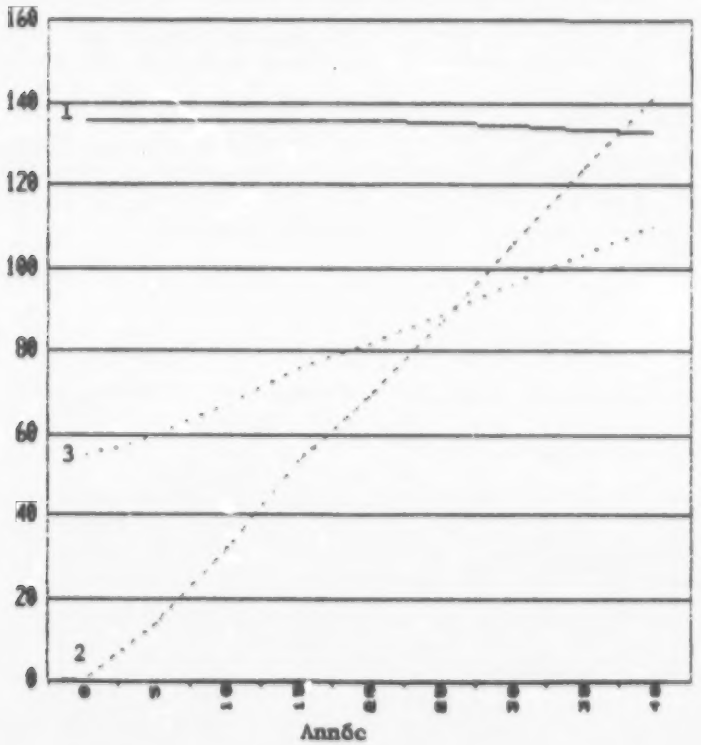
Figure A3: DEMANDE UTILE EN PETAJOULES DU SECTEUR RESIDENTIEL (PAR SOUS-SECTEURS)



Légende:

1: Chauffage anciens logements
2: Chauffage nouveaux logements
3: Electricité spécifique
4: Chauffage de l'eau

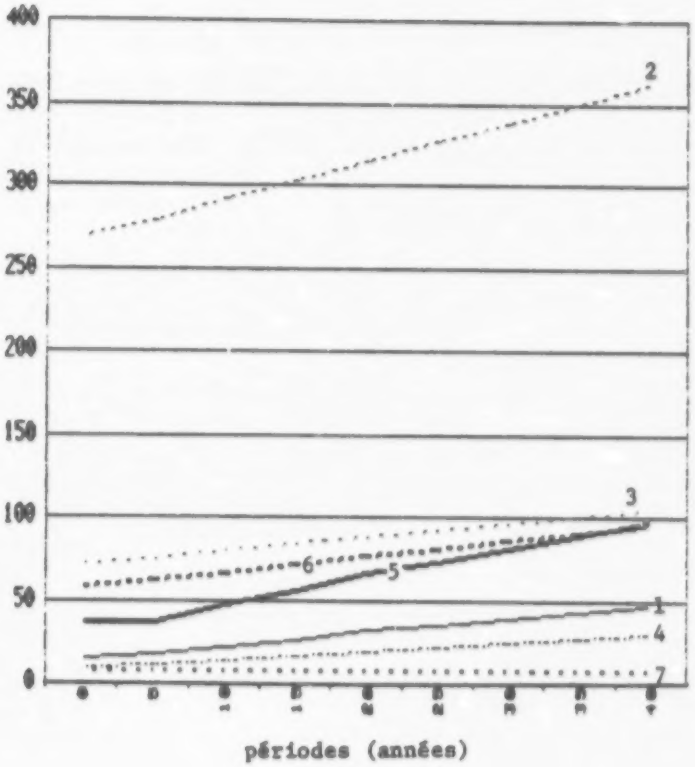
Figure A4: DEMANDE UTILE EN PETAJOULES DU SECTEUR COMMERCIAL (PAR SOUS-SECTEURS)



Légende:

1: Chauffage anciens édifices
2: Chauffage nouveaux édifices
3: Electricité spécifique

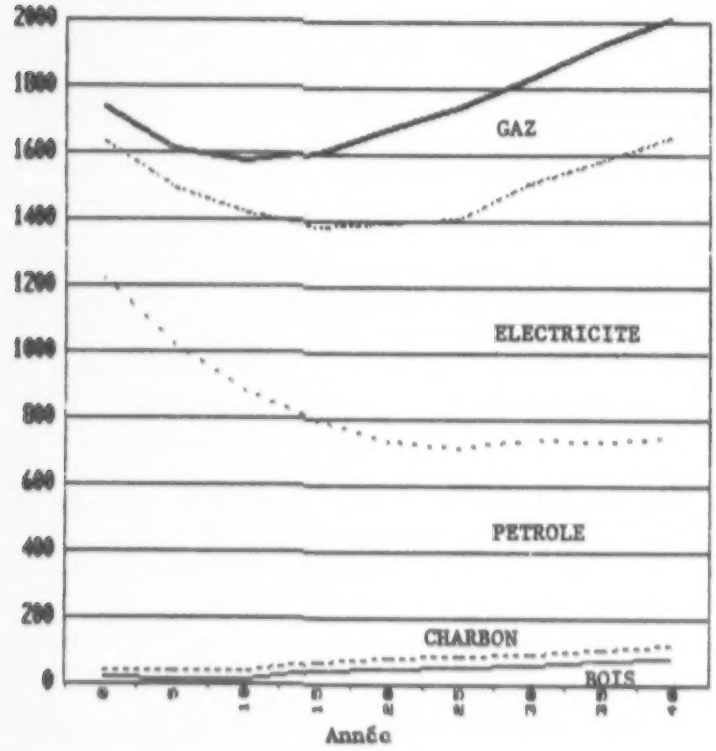
Figure A5: DEMANDE UTILE EN PETAJOULES DU SECTEUR DES TRANSPORTS (PAR SOUS-SECTEURS)



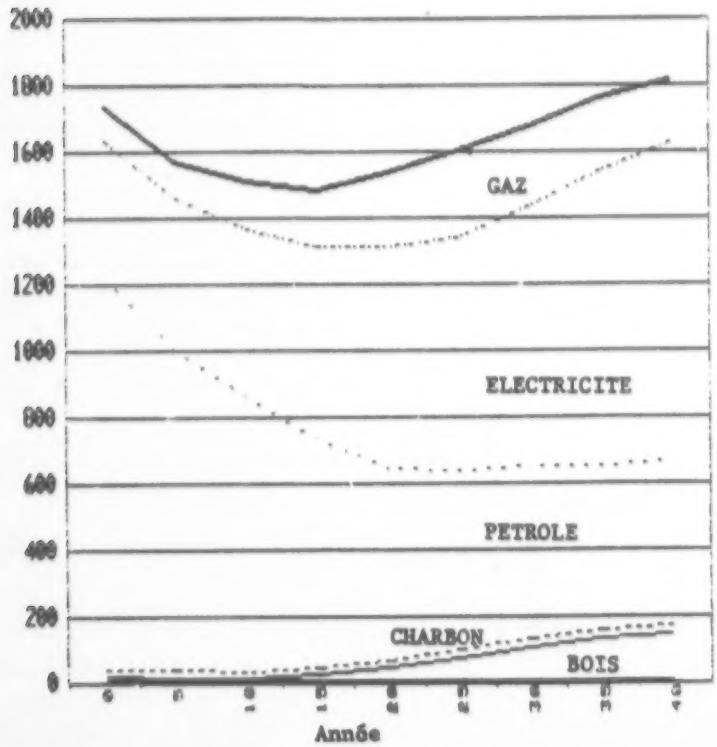
Légende:

1: Ferroviaire
2: Automobile
3: Camionnage
4: Autobus
5: Avion
6: Maritime
7: Autres

Figure A6: ENERGIE PRIMAIRE: Consommations annuelles en PJ (cumulatives)

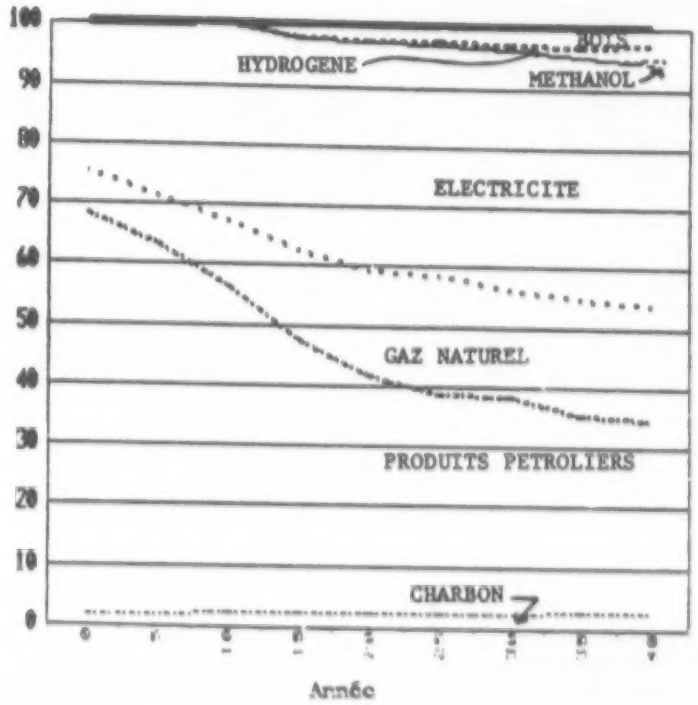


a) Scénario "0"



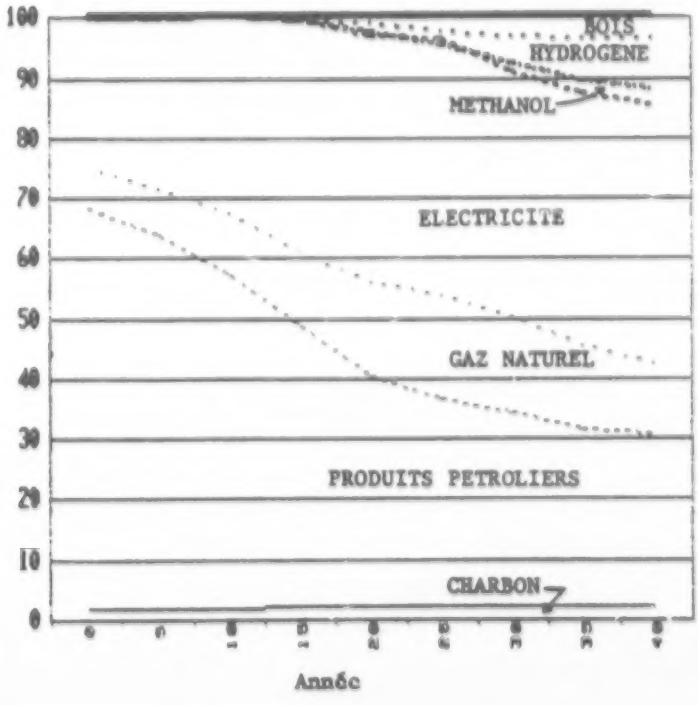
b) Scénario "P"

Figure A7: ENERGIE FINALE (proportions par formes)



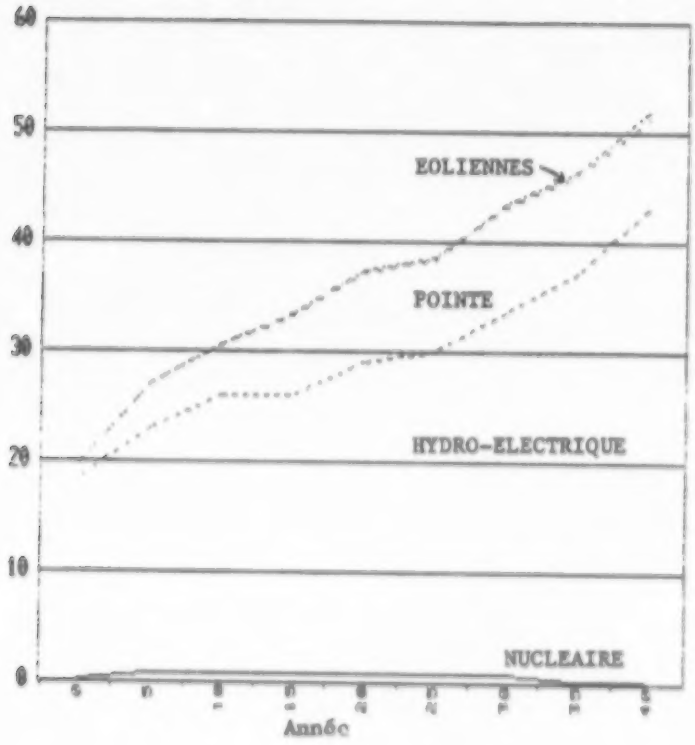
a) Scénario "0"

ENERGIE FINALE (pourcentages cumulés par forme)

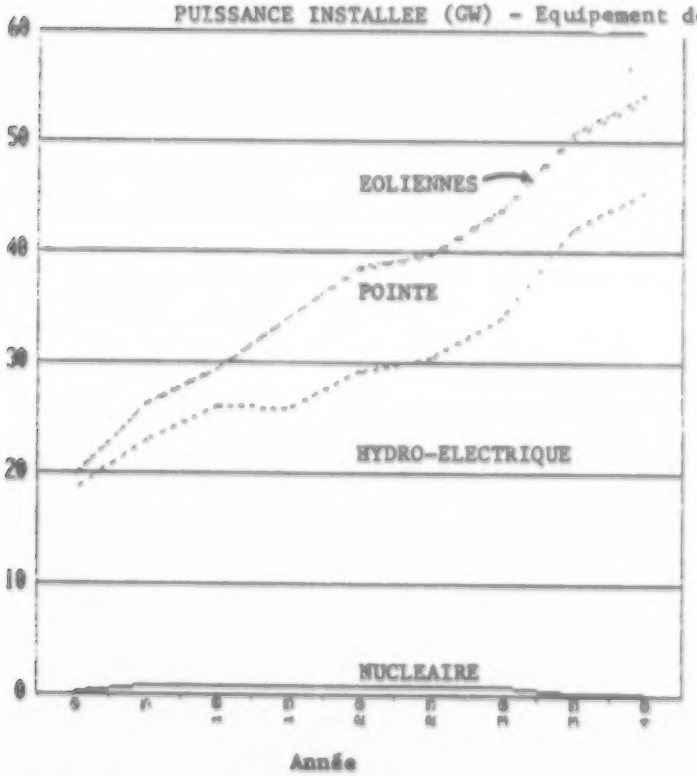


b) Scénario "p"

Figure A8: PUISSANCE INSTALLEE (GW) - Equipement de production d'électricité

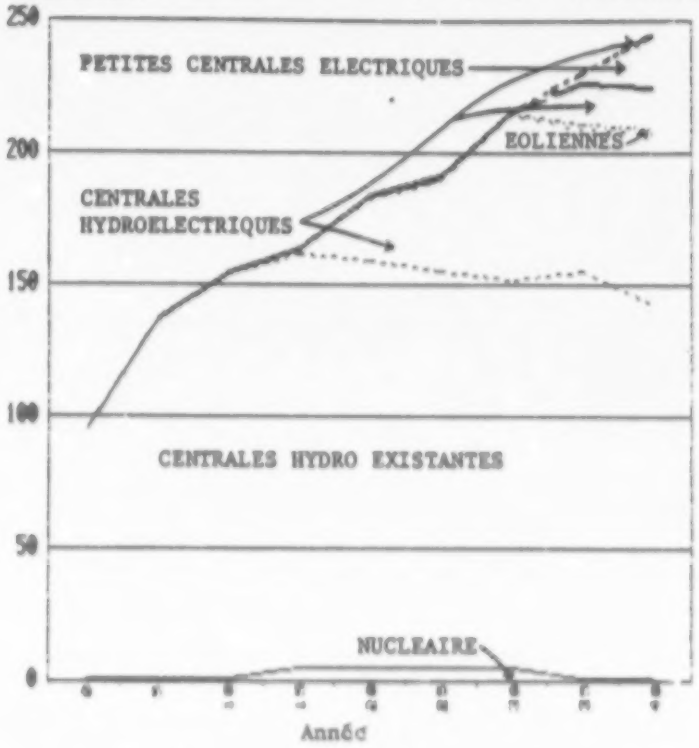


a) Scénario "O"



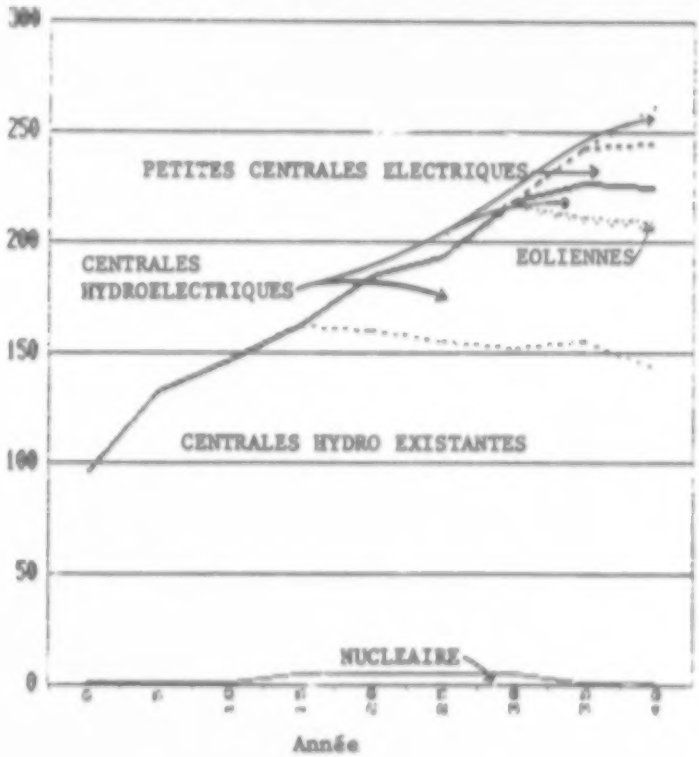
b) Scénario "P"

Figure A9: PRODUCTION ELECTRIQUE (TWH) - Production cumulative au Québec



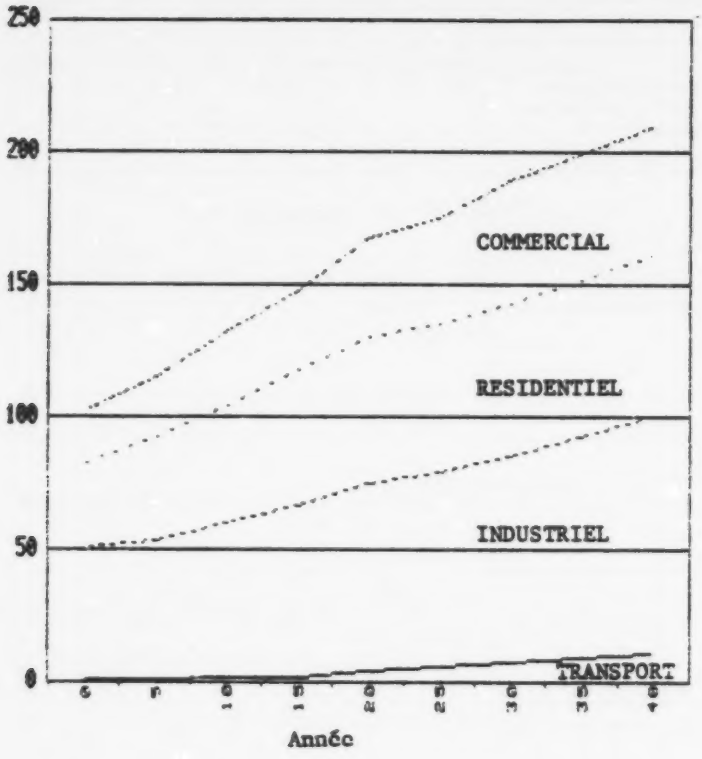
a) Scénario "0"

PRODUCTION ELECTRIQUE (TWH) - Production cumulative au Québec



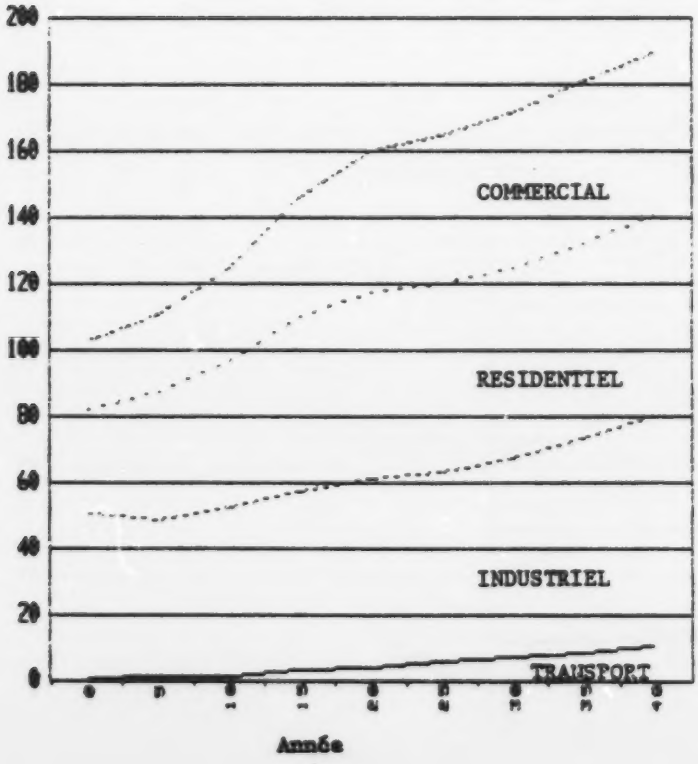
b) Scénario "P"

Figure A10: DEMANDE FINALE D'ELECTRICITE (TWH) PAR SECTEUR (cumulative)



a) Scénario "O"

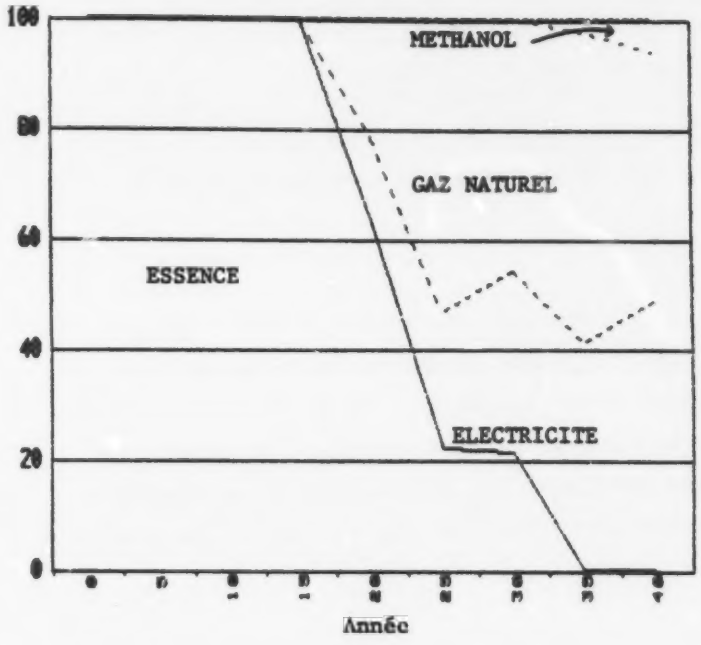
DEMANDE FINALE D'ELECTRICITE (TWH) PAR SECTEUR (cumulative)



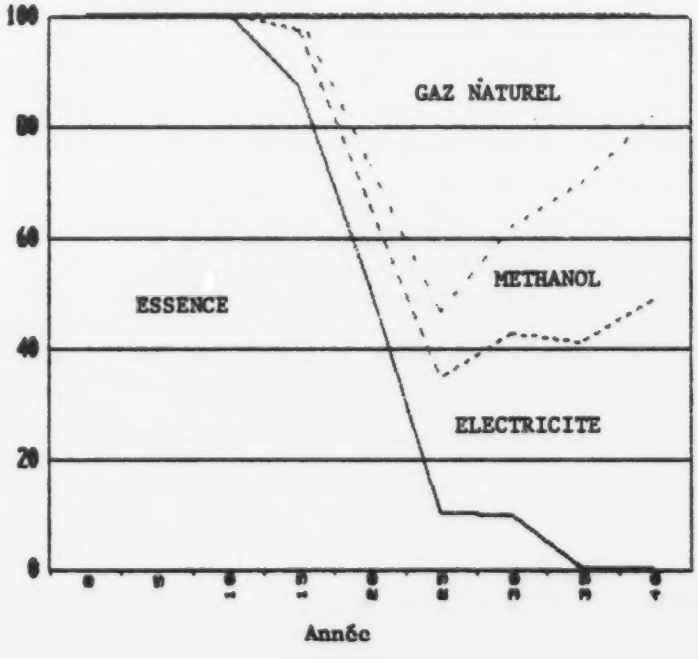
b) Scénario "P"

Figure A11: PARC AUTOMOBILE (composition en pourcentages)

Scénario "0"



PARC AUTOMOBILE (composition en pourcentages)



Scénario "P"

Vers un couplage entre MEDEE et MARKAL basé sur la recherche d'un équilibre partiel réglementé*

C. Berger**, A. Haurie**, G. Lafrance***,
R. Loulou****, P. Marcotte***** et J.P. Surprenant***

Résumé: Nous étudions dans cet article la possibilité d'effectuer le couplage entre un modèle de simulation de la demande énergétique (MEDEE-3-QUEBEC) et un modèle d'offre (MARKAL-Production), en vue d'obtenir un équilibre partiel réglementé. Nous présentons une méthodologie de recherche d'un tel équilibre basé sur la programmation mathématique, ainsi que des résultats préliminaires.

* Recherche subventionnée par le fonds FCAC (action spontanée #83-AS-0026 et subvention d'équipe #0428) ainsi que par le CRSH-Canada (subvention #410-81-0722-R2).

** GERAD, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, 5255 avenue Decelles, Montréal, Québec H3T 1V6 Canada.

*** INRS-énergie, 1650 Montée Ste-Julie, Varennes, Québec J0L 2P0.

**** Faculty of Management, McGill University, 1001 Sherbrooke St. West, Montréal, Québec H3A 1G5.

***** GERAD et Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Case postale 6128, Succursale "A", Montréal, H3C 3J7.

1. INTRODUCTION

L'énergie est un bien intermédiaire utilisé pour la production de biens et services en même temps que d'autres facteurs tels que la main d'oeuvre, l'équipement etc... L'imbrication du secteur énergétique dans l'ensemble du panorama économique d'une région va tendre à introduire un certain nombre de boucles de contreréaction entre la demande finale de biens et services dans l'économie considérée, les substitutions entre facteurs de production, les substitutions entre formes d'énergie et donc la demande d'énergie finale par forme. Plus précisément la variation du prix d'une forme d'énergie finale, par exemple le pétrole, va déclencher une série d'ajustements directs et indirects impliquant les choix technologiques et les choix de consommation des agents concernés, qui se répercuteront finalement sur la demande des différentes formes d'énergie finale.

Ce système dynamique et complexe peut être "observé" à l'aide de différents instruments que constituent les modèles.

Un modèle économétrique comme ceux développés par Cao [4] pour le Québec, Marchon et VanPeeterssen [11] pour le Canada, retient sous une forme agrégée une description de la relation globale qui existe entre les prix des formes d'énergie finale et leurs demandes respectives. Cette description est statistique plutôt que structurelle. Elle aboutit à l'estimation d'élasticités de la demande aux prix et d'élasticités de substitution entre facteurs (énergie contre capital), réalisées à partir de l'observation des comportements passés des agrégats économiques. Un tel modèle est donc une schématisation à grands traits et une vue rétrospective du système.

Une autre catégorie de modèles, comme MEDEE, pourraient être qualifiés de modèles structurels tendanciels. Ces modèles essaient de prendre

en compte explicitement le processus de choix des principaux agents économiques consommateurs d'énergie. Des "fonctions de choix" intégrant des facteurs tant quantitatifs que qualitatifs, décrivent le comportement des agents, à un niveau très désagrégé. Une comptabilité énergétique est alors réalisée pour établir la correspondance entre l'énergie utile, qui exprime les besoins, et l'énergie finale qui sert à satisfaire ces besoins. Un tel modèle est donc une description très détaillée d'hypothèses de comportement et constitue une vue prospective du système.

Enfin dans une troisième catégorie de modèles, que nous pourrions qualifier de modèles structurels finalisés, se trouvent les modèles basés sur la programmation mathématique dont une présentation générale a été fournie par J. Boucher et Y. Smeers dans un des articles de ce numéro de la revue. Le secteur énergétique est représenté par un ensemble d'activités transformant des ressources et soumises à des contraintes technologiques et à des contraintes de demande. Une finalité est introduite dans le système sous la forme d'une recherche de l'optimum d'un critère de performance. Un tel modèle est donc une description détaillée de la structure de production du secteur énergétique et fournit une vue "normative" du système permettant une exploration cohérente de scénarios techno-économiques.

Dans cet article nous explorons la possibilité de coupler deux modèles, MEDEE-QUEBEC qui est un modèle de simulation de la détermination de la demande d'énergie finale au Québec, et MARKAL-Production qui est une version réduite de MARKAL-QUEBEC concentrée sur la description du système de production de l'énergie finale. Le couplage que nous envisageons de réaliser sera basé sur la recherche d'un équilibre partiel entre l'offre et la demande d'énergie finale, MEDEE-QUEBEC fournissant une simulation des fonctions de demande et MARKAL-Production une description des fonctions d'offre.

La figure 1.1 schématise le champ de modélisation couvert par MARKAL-QUEBEC et MEDEE-QUEBEC. On a indiqué, au bas de cette figure les parties de cet ensemble de modules incluses dans chacun des modèles. On peut ainsi voir la zone de recouvrement entre les deux modèles ainsi que la complémentarité des deux approches.

Dans un couplage entre ces deux modèles on doit nécessairement réduire l'étendue de l'un ou de l'autre. Par exemple, nous pourrions envisager un couplage MARKAL-MEDEE où MARKAL-QUEBEC serait conservé dans son intégralité, cependant que la scénarisation hiérarchisée de MEDEE-QUEBEC servirait uniquement à construire un scénario d'évolution de la demande d'énergie utile par secteur. La figure 1.2 schématise cette possibilité de couplage. Une difficulté méthodologique de taille apparaît dans cette approche, puisque les concepteurs de MEDEE insistent sur le fait que la demande d'énergie utile n'est pas indépendante des choix technologiques effectués*. Cependant, l'avantage de la démarche est de ne nécessiter qu'une seule scénarisation MEDEE, et de fournir une analyse marginale pour chaque technologie d'usage ce qui permet d'en évaluer les importances relatives. Un tel couplage s'avérerait instructif dans une démarche prospective orientée surtout vers l'analyse de la R et D dans le domaine énergétique.

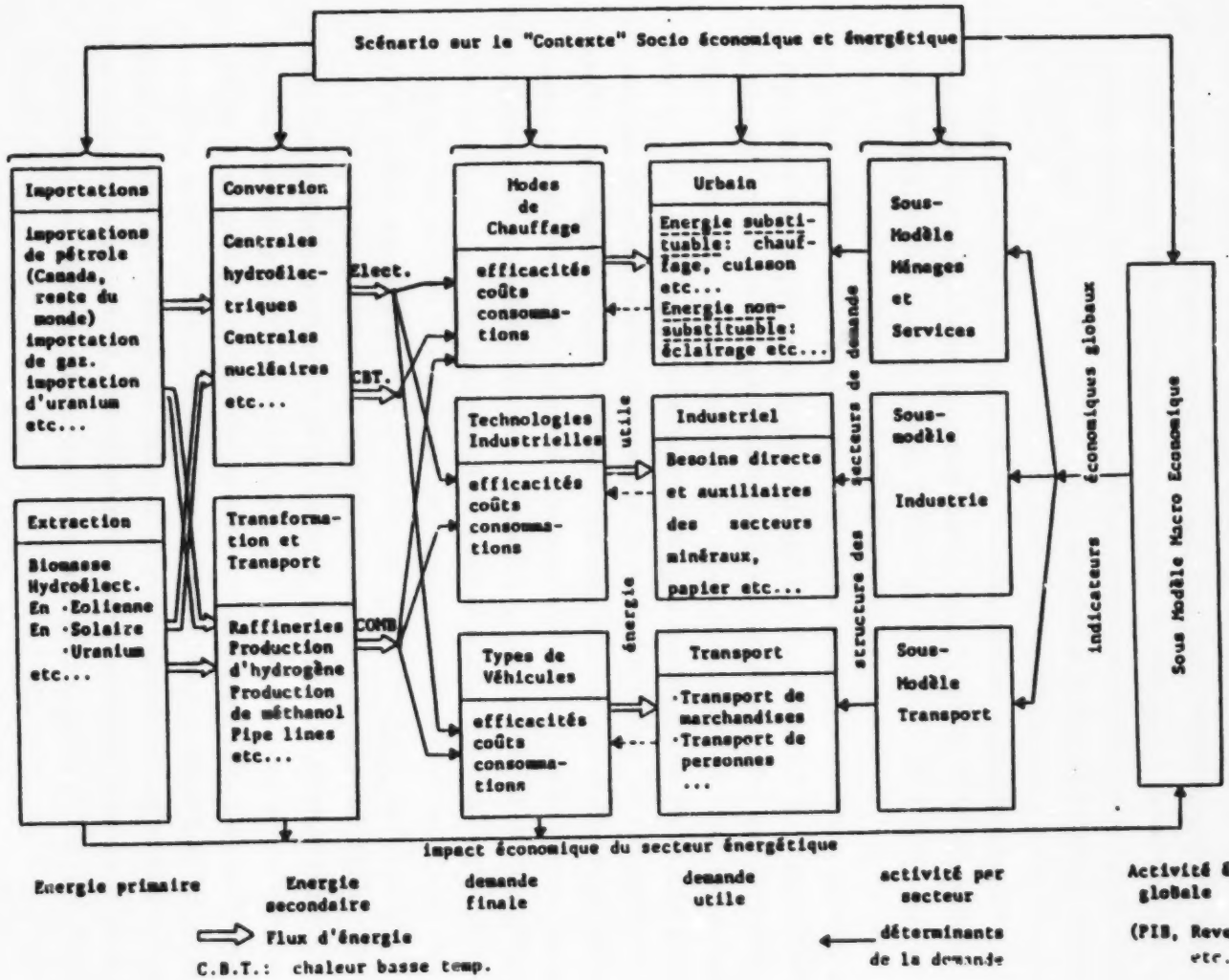
Un couplage MEDEE-MARKAL, par contre donne le rôle de modèle maître à MEDEE-QUEBEC qui envoie vers MARKAL-Production une information en termes de demande d'énergie finale et qui reçoit de ce modèle d'offre une information sur les disponibilités et les coûts marginaux (prix implicites) par forme d'énergie. Ce couplage est schématisé sur la figure 1.3. Fondamentalement cette démarche consiste à calculer un équilibre partiel réglementé entre l'offre et la demande d'énergie finale. L'équilibre est réglementé, du fait de l'existence de taxes et subventions qui font que la tarification de l'énergie finale ne s'effectue pas à son coût marginal.

---

* Remarquons que cette réserve est de même nature que celle qui concerne le fait que la demande utile elle même n'est pas indépendante des prix de l'énergie.

On pourrait toujours envisager de procéder à une série d'ajustements successifs de type "Cobweb" pour corriger ces effets.

Figure 1.1: Zone de recouvrement entre MEDEE et MARKAL



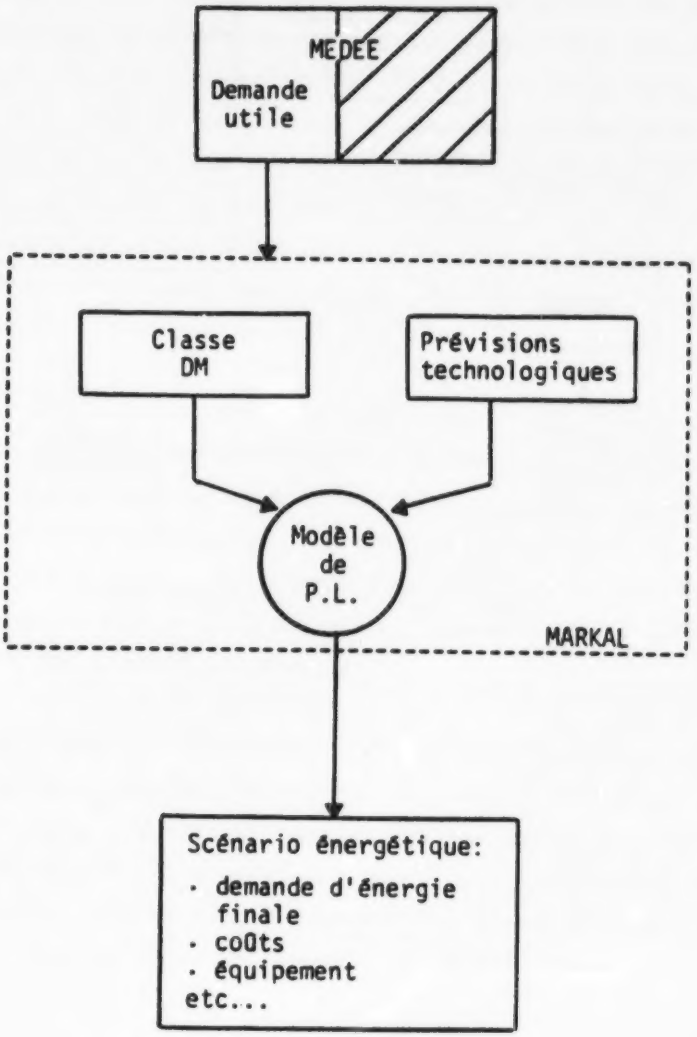


Figure 1.2: Couplage MARKAL-MEDEE

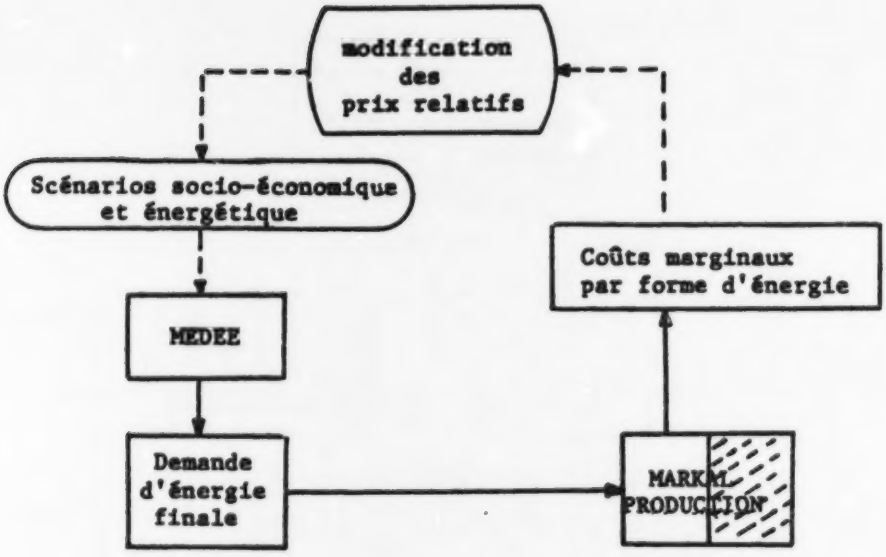


Figure 1.3: Couplage MEDEE-MARKAL

Donc, dans ce type de couplage, un modèle de production représente l'ensemble des technologies disponibles pour fournir les formes d'énergie finale demandées. Ce modèle de production incluant l'ensemble des activités d'investissement et de production, permet de calculer un coût marginal à long terme pour chacune des formes d'énergie finale. Il peut donner aussi une indication sur le coût moyen. A partir de ces informations, on peut établir une tarification des différentes formes d'énergie finale, en tenant compte des coûts marginaux, de la taxation, des subventions ou même des tarifications basées sur un coût moyen.

Cette tarification est prise en compte dans MEDEE-QUEBEC qui adapte le scénario de demande d'énergie finale. MEDEE-QUEBEC est alors un système complexe d'où émerge une information sur les fonctions de demande des différentes formes d'énergie finale. Un équilibre est atteint lorsque le scénario de demande définit des quantités demandées qui, une fois satisfaites optimalement par le modèle d'offre, engendrent un système de prix compatible avec le scénario de demande.

Cet article présente une méthodologie de recherche d'un tel équilibre. La section 2 donne un rapide description de MARKAL-Production. La section 3 discute de la notion d'équilibre partiel réglementé entre un modèle d'offre et un modèle de demande. La section 4 décrit un algorithme de la recherche d'un tel équilibre. La section 5 présente les premiers résultats numériques relatifs à un couplage entre MEDEE-QUEBEC et MARKAL-Production.

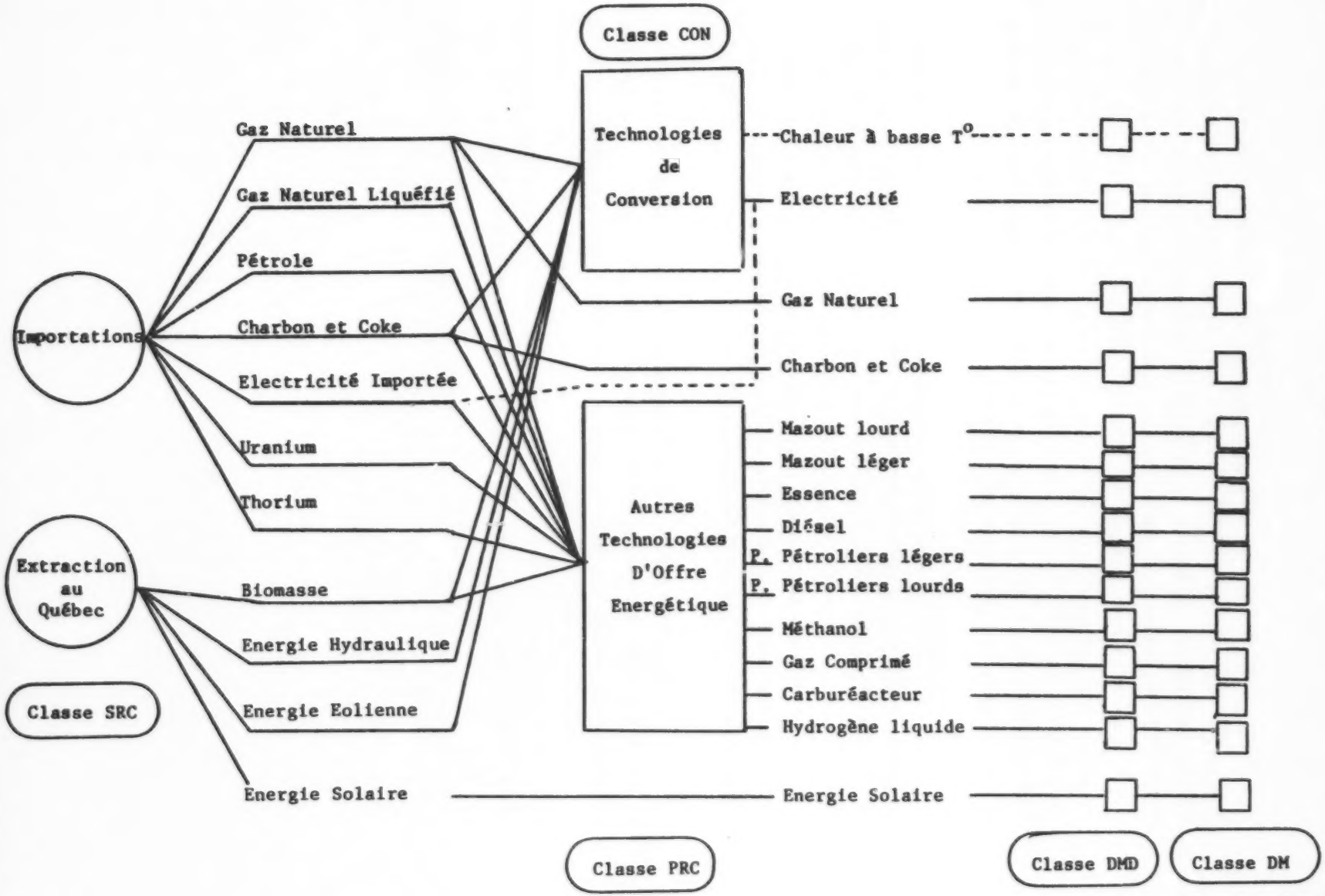


Figure 2.1: Structure de MARKAL-Production

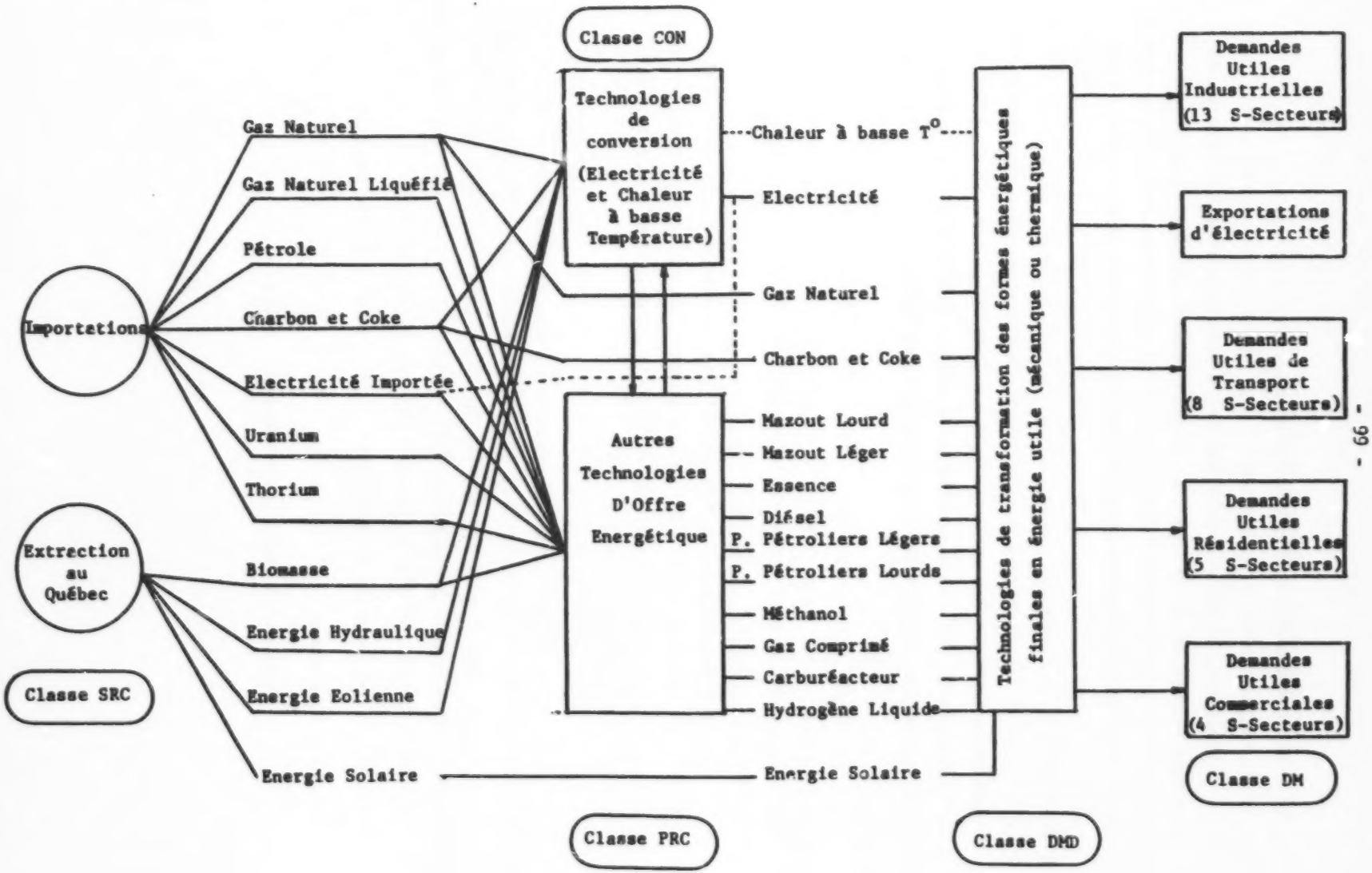


Figure 2.2: MARKAL-QUEBEC: Le système énergétique de référence.

2. LE MODELE D'OFFRE MARKAL-PRODUCTION

Comme on l'a indiqué dans l'article présentant MARKAL-QUEBEC, dans ce même numéro de la revue, une version réduite de ce modèle global, appelée MARKAL-Production a été construite en éliminant du premier modèle tous les choix énergétiques au niveau de la satisfaction de la demande utile.

Plus précisément, au lieu d'avoir plusieurs technologies possibles pour satisfaire la demande on n'en considère qu'une seule, fictive, d'efficacité 100%. La demande utile, fournie au modèle réduit, coïncide alors avec la demande d'énergie finale qui est, de fait, une donnée exogène.

La figure 2.1 schématise la structure de MARKAL-Production. Cette figure doit être rapprochée de la figure 2.2 pour bien saisir la différence qui existe entre MARKAL-QUEBEC et MARKAL-Production.

Du fait que MARKAL-Production est une version réduite de MARKAL-QUEBEC, on trouvera dans [10] la liste des principales activités retenues. Un rapport [9] permettra aussi au lecteur intéressé d'avoir plus de détails sur ce modèle d'offre.

Nous ne saurions terminer cette brève description sans souligner les différences entre les variables duales associées aux contraintes de bilan énergétique dans chacun des modèles MARKAL-QUEBEC et MARKAL-Production. Dans le modèle global, MARKAL-QUEBEC (voir [9]), on a, pour chaque période et chaque forme d'énergie, les contraintes suivantes:

$$\text{Importation} + \text{Production} \geq \text{Exportation} + \text{Consommation} \qquad (2.1)$$

ou, plus simplement:

$$\text{Production nette} \geq \text{Consommation nette.} \qquad (2.2)$$

Dans un contexte de minimisation du coût total actualisé, la variable duale associée à la contrainte (2.2) représente le coût marginal correspondant à une augmentation de la disponibilité d'une forme d'énergie. Cette augmentation peut être obtenue soit en augmentant la production, soit en diminuant la consommation. La variable duale obtenue constitue donc une borne inférieure sur le coût marginal de production.

Dans MARKAL-Production, par contre, la consommation est fournie exogènement. La variable duale associée représente exactement le coût marginal de production, qui sera transmis, après quelques modifications, au modèle de demande MEDEE-QUEBEC. Ces coûts marginaux sont des coûts marginaux à long terme, puisqu'ils tiennent compte de programmes d'investissement à long terme (25 ans).

3. EQUILIBRE PARTIEL ENTRE LE MODELE D'OFFRE ET LE MODELE DE DEMANDE

Selon MEDEE la demande d'énergie finale provient de l'intégration d'un ensemble de facteurs techniques (efficacité, convenance, etc.), sociologiques (habitudes, attitudes, etc.) et économiques (disponibilités, prix, etc.), par une population d'usagers qui doit satisfaire un certain nombre de besoins énergétiques (production de biens, chauffage, transport, etc.). Si l'on fixe l'ensemble des facteurs à l'exception des prix des différentes formes d'énergie, MEDEE fournit, la façon implicite, une loi réciproque de demande

$$\underline{P} = f(\underline{D}) \tag{3.1}$$

où $\underline{D}$ est le vecteur des quantités demandées d'énergie finale par forme et $\underline{P}$ est le vecteur des prix aux consommateurs de ces différentes formes d'énergie.

Selon MARKAL l'offre d'énergie s'organise de façon à minimiser sur un certain horizon de planification la somme des coûts des activités d'investissement et de production. Le programme linéaire optimal, fourni par MARKAL-Production, sera la solution du problème d'optimisation

$$\text{Min} \quad \underline{c}\,\underline{x} \tag{3.2}$$

s.c.

$$\underline{A}_1\,\underline{x} = \underline{b} \tag{3.3}$$

$$\underline{A}_2\,\underline{x} = \underline{Q} \tag{3.4}$$

$$\underline{x} \geq 0$$

où $\underline{x}$ est le vecteur des niveaux d'activité, les contraintes (3.3) représentent les contraintes technologiques du système de production et les contraintes (3.4) représentent les contraintes de demande à satisfaire, c'est-à-dire de niveau de production à atteindre.

La théorie de la dualité en programmation linéaire indique que les valeurs du programme dual optimal, associées au contraintes (3.4) constituent un système de prix implicites $\underline{\Pi}$ pour les différentes formes d'énergie finale fournies, correspondant à leurs coûts marginaux de production respectifs.

Ainsi, en résolvant le problème de programmation linéaire (3.2)-(3.4) pour différentes valeurs de la production à atteindre $\underline{Q}$, on peut construire une fonction

$$\underline{\Pi} = g(\underline{Q}) \qquad (3.5)$$

qui apparaît comme la forme réciproque d'une fonction d'offre du système de production d'énergie.

En l'absence de règlementation gouvernementale un équilibre partiel sera atteint entre les modèles MEDEE et MARKAL lorsque la demande prévue $\underline{D}$, à partir des prix $\underline{P}$, en (3.1) fournie au modèle d'offre (3.2)-(3.4), en posant

$$\underline{Q} = \underline{D}$$

engendre des coûts marginaux $\underline{\Pi}$ qui vérifient

$$\underline{\Pi} = \underline{P} \quad . \qquad (3.7)$$

Comme le marché de l'énergie est, en fait, règlementé, le système de prix aux consommateurs est différent du système de prix aux producteurs. Comme l'indiquent Greenberg et Murphy [6], cette distortion du marché peut être prise en compte dans un modèle d'équilibre partiel, en assimilant les taxes et subventions à des tarifs de distribution entre producteurs et consommateurs.

Pour les fins de l'exposition il est avantageux de ne considérer qu'une seule ressource (forme finale d'énergie), produite par m différents producteurs et consommée par n consommateurs.

Le producteur i est caractérisé par une fonction (réciproque) d'offre

$$\Pi_i = g_i\ (Q_i) \qquad i = 1,\ldots,m \qquad (3.8)$$

et le consommateur j est caractérisé par une fonction (réciproque) de demande

$$P_j = f_j\ (D_j) \qquad j = 1,\ldots,n \qquad (3.9)$$

Soit z_{ij} la quantité distribuée du producteur i au consommateur j et soit t_{ij} le coût de cette distribution, ce coût traduira comme nous le verrons bientôt, la politique de taxation et de subvention de l'état.

Il y aura équilibre sur ce marché si l'on détermine un système de prix $\underline{\Pi}$ et de productions $\underline{Q}$ pour les producteurs, un système de prix $\underline{P}$ et de demande $\underline{D}$ pour les consommateurs tels que les conditions suivantes soient vérifiées

a) contraintes d'offre

$$\sum_{j=1}^{n} z_{ij} = Q_i \qquad i = 1,\ldots,m \qquad (3.10)$$

$$\Pi_i = g_i\ (Q_i) \qquad i = 1,\ldots,m \qquad (3.11)$$

b) contraintes de demande

$$\sum_{i=1}^{m} z_{ij} = D_j \qquad j = 1,\ldots,n \qquad (3.12)$$

$$P_j = f_j\ (D_j) \qquad j = 1,\ldots,n \qquad (3.13)$$

c) contraintes de complémentarité

$$z_{ij} > 0 \quad \text{entraine} \quad P_j = \Pi_i + t_{ij} \qquad \begin{matrix} i = 1,\ldots,m \\ j = 1,\ldots,n \end{matrix} \qquad (3.14)$$

d) $$z_{ij} \geq 0 \qquad (3.15)$$

Greenberg et Murphy [6] montrent que les taxes ou subventions, de même que la tarification au coût moyen, peuvent se représenter comme une fonction

$$\underline{T} : R_+^{m+n} \rightarrow R^{m+n} \qquad (3.16)$$

qui associe à un couple ($\underline{\Pi}$, $\underline{P}$) de systèmes de prix d'offre et de demande, un vecteur $\underline{t} = \underline{T}\ (\underline{\Pi}, \underline{P})$ de tarifs de distribution.

Dans un équilibre règlementé il faudra donc déterminer aussi les tarifs t_{ij} en imposant les contraintes supplémentaires suivantes

e) contraintes de tarifs

$$\underline{t} = \underline{T}\ (\underline{\Pi}, \underline{P}) \qquad (3.17)$$

La méthode suggérée par ces auteurs pour trouver un équilibre règlementé consiste à fixer les tarifs $\underline{t}$, à trouver un équilibre tel que défini en (3.10)-(3.15), à ajuster les tarifs à l'aide de (3.17) et à "boucler" ainsi, selon une approche de type "Cobweb" ou de Gauss-Seidel. Les conditions de convergence de cet algorithme sont discutées dans l'article cité.

Pour implanter cet algorithme dans le couplage MEDEE-MARKAL il faudra tout d'abord étendre l'approche au cas où l'offre et la demande s'exercent sur plus d'une ressource.

Cette généralisation pourra se faire en suivant l'approche utilisée par Hogan [8] dans le modèle PIES. Cette approche, et la conversion du problème de calcul d'un équilibre en une suite de problèmes de programmation convexe, sont présentée dans la prochaine section.

4. METHODE DE RECHERCHE D'UN EQUILIBRE PARTIEL ENTRE LE MODELE D'OFFRE ET LE MODELE DE DEMANDE

Le calcul d'équilibres économiques peut se ramener à des calculs de "points fixes" de transformations d'un espace dans lui même à la façon de Scarf et Hansen [14], ou aussi à la solution de problèmes de complémentarité.

Pour certaines classes de problèmes on peut établir une équivalence entre la recherche d'un équilibre et la solution d'un problème de programmation mathématique convexe. L'idée initiale revient à Samuelson [13], Takayama et Judge [15] ont opérationnalisé cette approche et, dans le domaine de l'énergie, Hogan [8] l'a adaptée avec succès dans le cadre du modèle PIES. Une adaptation de l'algorithme de Hogan à un modèle énergétique dynamique pour le Canada a été réalisée par Daniel et Goldberg [5].

Nous présenterons tout d'abord les grandes lignes de la méthodologie de calcul d'un équilibre par une approche de programmation mathématique; nous indiquerons ensuite comment cet algorithme devra être implanté sur MEDEE et MARKAL-Production.

4.1 Algorithme de Hogan pour le calcul d'un équilibre

Considérons tout d'abord le cas le plus simple d'une seule ressource et de deux fonctions,

$$P = P_o (Q) \qquad Q > 0$$

$$P = P_d (Q) \qquad Q > 0$$

appelées respectivements les fonctions (réciproques) d'offre et de demande. La figure 4.1 représente les graphes de ces deux fonctions et l'équilibre qui correspond au point d'intersection des graphes.

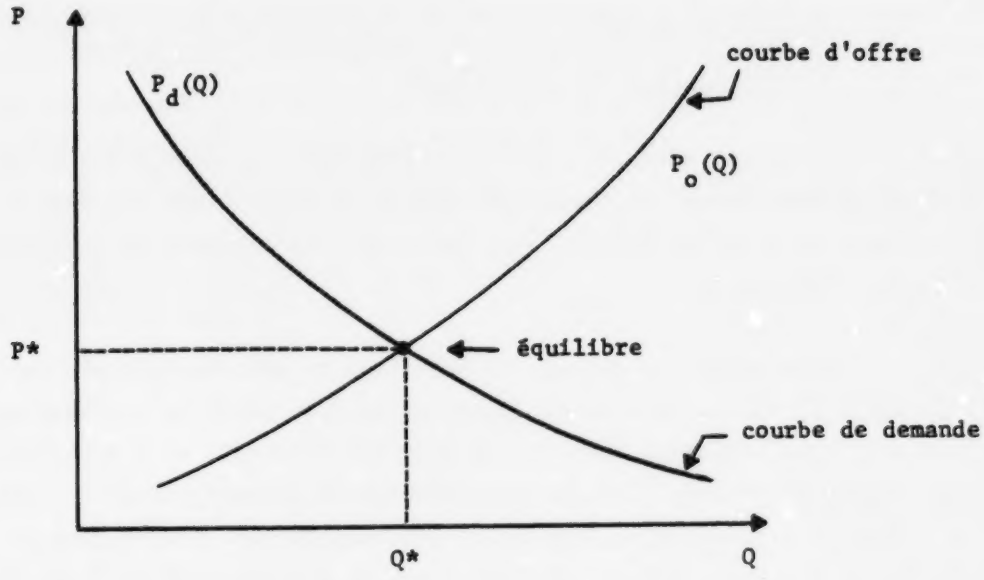


Figure 4.1: Equilibre offre-demande

Il suffit d'avoir les conditions naturelles suivantes

$$P_o'(Q) > 0 \quad , \quad Q > 0 \tag{4.1}$$

$$P_d'(Q) < 0 \quad , \quad Q > 0$$

pour que les fonctions

$$F(Q) = \int_0^Q P_o(q)\, dq \quad , \quad Q > 0 \tag{4.3}$$

et

$$G(Q) = \int_0^Q P_d(q)\, dq \quad , \quad Q > 0 \tag{4.4}$$

soient respectivement convexe et concave[1].

D'autre part on vérifiera directement sur le graphique de la figure 4.1 que la quantité d'équilibre Q* est telle que

$$Q^* = \min_Q \arg \{F(Q) - G(Q)\} \tag{4.5}$$

c'est-à-dire correspond au minimum d'une fonction convexe.

---

(1) Notons que, pour que l'intégrale (4.4) soit définie il se peut qu'il faille intégrer à partir d'une borne inférieure $\varepsilon>0$ au lieu de 0, du fait du comportement de $P_d(Q)$ près de 0.

C'est cette propriété de base qui est étendue et exploitée dans le cas où la fonction d'offre est définie implicitement par un modèle de production et où la fonction de demande est de la forme

$$\underline{D} = \underline{f}(\underline{P}) \tag{4.6}$$

où $\underline{D}$ est le vecteur des quantités demandées de chaque ressource et $\underline{P}$ le vecteur des prix de ces ressources.

L'analogue de la fonction F(Q), définie en (4.3), va être fourni par l'optimum de coût du problème de programmation linéaire associé au modèle de production, c'est-à-dire

$$F(\underline{Q}) = \min \quad \underline{c}\,\underline{x} \tag{4.7}$$

s.c.

$$\underline{A}_1\,\underline{x} = \underline{b} \tag{4.8}$$

$$\underline{A}_2\,\underline{x} = \underline{Q} \tag{4.9}$$

$$\underline{x} \geq 0$$

Ceci est cohérent avec l'interprétation de la fonction d'offre comme étant aussi la fonction de coût marginal. L'intégrale des coûts marginaux, jusqu'aux niveaux $\underline{Q}$ fournit alors le coût $\underline{c}\,\underline{x}$ minimal pour satisfaire cette contrainte de production.

L'analogue de la fonction G(Q), définie en (4.4) n'existera pas nécessairement, en particulier si la loi de demande (4.6) présente des élasticités croisées non symétriques.

L'idée de base de l'algorithme de Hogan consiste alors à négliger localement les effets croisés dans la demande pour chaque ressource. Plus précisément, au voisinage d'un vecteur de quantités $\underline{Q}^k$, les fonctions réciproques

$$P_i = g_i^k(Q_i) = P_{d,i}(Q_1^k, \ldots, Q_{i-1}^k, Q_i, Q_{i+1}^k, \ldots, Q_n^k)$$

$$Q_i > 0 \quad , i = 1, \ldots, n \tag{4.10}$$

peuvent être utilisées pour définir le problème de programmation convexe

$$\min_{\underline{Q}} \{F(\underline{Q}) - \sum_{i=1}^{n} \int_{o}^{Q_i} g_i^k(q_i)\, dq_i\} \qquad (4.11)$$

où $F(\underline{Q})$ est définie en (4.7)-(4.9).

La solution de (4.11) fournira une approximation de l'équilibre, appelée $\underline{Q}^{k+1}$, à partir de laquelle de nouvelles fonction $g_i^{k+1}(Q_i)$ seront définies comme en (4.10) et un nouvel équilibre approché sera obtenu en (4.11), etc.

Les conditions de convergence de l'algorithme du modèle PIES ont été données par Ahn et Hogan [1]. Le problème d'optimisation convexe (4.11) est lui même approximé par un problème de programmation linéaire en remplaçant chaque fonction $g_i^k(Q_i)$ par une approximation sous la forme d'une fonction constante par morceaux, telle qu'illustrée en figure 4.2.

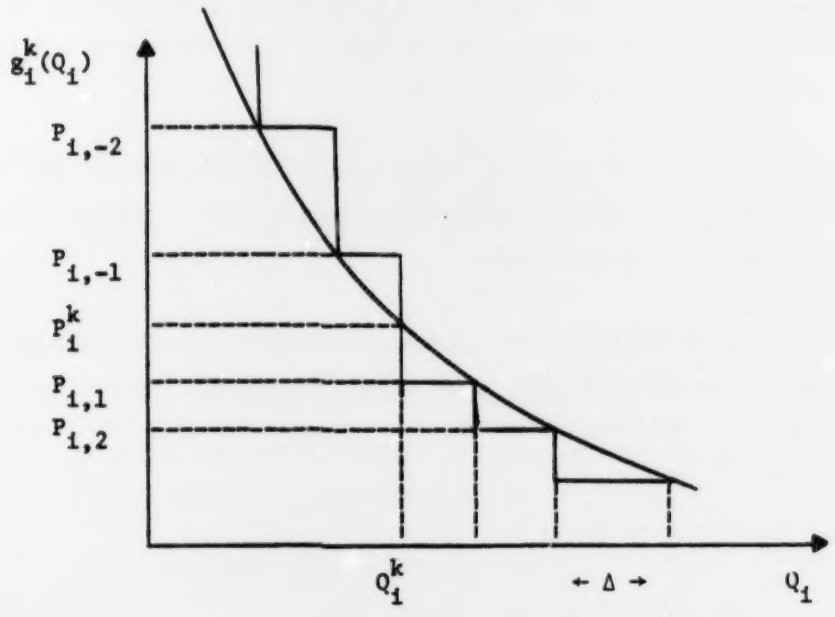


Figure 4.2: Approximation de la fonction de demande $g_i^k(Q_i)$ par une fonction constante par morceaux.

Afin de pouvoir directement traiter un problème de la forme (4.12)-(4.15) à l'aide du logiciel MARKAL-Production, on introduit, pour chaque forme d'énergie, des sources d'approvisionnement correspondant aux paliers des fonctions de demandes $g_i^k(Q_i)$ (voir Figure 4.2). Chaque source d'approvisionnement possèdera une capacité égale à Δ et un coût de production égal au prix $P_{i,j}$ du palier correspondant. Ce traitement d'élasticités-prix directes par MARKAL est décrit dans [2].

Le problème (4.11) se met alors sous la forme d'un problème de programmation linéaire

$$\text{Min } \underline{c}\ \underline{x} - \sum_{\ell} (\underline{P}_{\ell}\ \underline{y}_{\ell} - \underline{P}_{-\ell}\ \underline{y}_{-\ell}) \tag{4.12}$$

s.c.

$$\underline{A}_1\ \underline{x} = \underline{b} \tag{4.13}$$

$$\underline{A}_2\ \underline{x} - \sum_{\ell} \underline{y}_{\ell} + \sum_{\ell} \underline{y}_{-\ell} = \underline{Q}^k \tag{4.14}$$

$$\underline{x} \geq 0$$

$$0 \leq \underline{y}_{\ell},\ \underline{y}_{-\ell} \leq \Delta \tag{4.15}$$

où les vecteurs $\underline{P}_{\ell}$ et $\underline{P}_{-\ell}$ sont les prix associés aux différents paliers des approximations des fonctions g_i^k, cependant que les variables $\underline{y}_{\ell}$ et $\underline{y}_{-\ell}$ représentent les augmentations ou réduction de demande dans les intervalles successifs, de largeurs (possiblement variables) Δ, à partir de $\underline{Q}^k$.

4.2 Un algorithme de calcul basé sur la complémentarité

En état d'équilibre, le vecteur des coûts marginaux de production correspond aux prix fournis par la loi de demande (3.1). Cet état peut s'exprimer sous forme du problème de complémentarité non linéaire suivant:

$$\underline{c} + \underline{\Pi}\,\underline{A}_1 + \underline{\mu}\,\underline{A}_2 \geq 0 \tag{4.16}$$

$$\underline{x}(\underline{c} + \underline{\Pi}\,\underline{A}_1 + \underline{\mu}\,\underline{A}_2) = 0 \tag{4.17}$$

$$\underline{A}_1\,\underline{x} = \underline{b} \tag{4.18}$$

$$\underline{A}_2\,\underline{x} = \underline{Q} \tag{4.19}$$

$$\underline{\Pi} = f(\underline{Q}) \tag{4.20}$$

$$x \geq 0 \tag{4.21}$$

On peut alors créer un problème d'optimisation non linéaire dérivé, dont tout optimum global satisfait les équations et inéquations (4.16)-(4.21).

$$\underset{\underline{x},\underline{Q},\underline{\Pi},\underline{\mu}}{\text{Min}}\ \underline{x}(\underline{c} + \underline{\Pi}\,\underline{A}_1 + \underline{\mu}\,\underline{A}_2) \tag{4.22}$$

$$\text{s.c.} \quad \underline{c} + \underline{\Pi}\,\underline{A}_1 + \underline{\mu}\,\underline{A}_2 \geq 0 \tag{4.23}$$

$$\underline{A}_1\,\underline{x} = \underline{b} \tag{4.24}$$

$$\underline{A}_2\,\underline{x} = \underline{Q} \tag{4.25}$$

$$\underline{\Pi} - f(\underline{Q}) = 0 \tag{4.26}$$

$$x \geq 0 \tag{4.27}$$

Bien que le problème (4.22)-(4.27) ne soit pas convexe, on peut montrer, sous certaines hypothèses sur la fonction f, que tout point satisfaisant les conditions d'optimalité du premier ordre constitue une solution d'équilibre. Ces hypothèses sur f sont moins fortes que les hypothèses garantissant la convergence de l'algorithme PIES de Hogan. Cependant son utilisation dans le contexte d'un couplage MARKAL-MEDEE exigerait de profondes modifications au logiciel MARKAL-Production. C'est pourquoi cette approche a été délaissée au profit de la méthodologie PIES.

4.3 Implantation d'un algorithme de calcul d'équilibre pour le couplage MEDEE-MARKAL

Le couplage entre le modèle de demande MEDEE et le modèle d'offre MARKAL-production va être réalisé en implantant une version dynamique de l'algorithme présenté en section 4.1, de façon assez similaire à l'approche suivie par Daniel et Goldberg [5], et en incorporant l'effet des taxes et subsides d'une façon similaire à l'approche suggérée par Greenberg et Murphy [6].

Les étapes de cette implantation sont les suivantes:

1. Sélectionner l'ensemble des producteurs représentés dans MARKAL-Production. Il y aura au moins un producteur par forme d'énergie finale. Il pourra y en avoir plus d'un si des taxes ou des subsides différenciés étaient appliqués à divers producteurs d'une même forme d'énergie finale.

2. Sélectionner l'ensemble des consommateurs dont les lois de demande sont représentées dans MEDEE. Ici aussi il y aura au moins un consommateur par forme finale, et éventuellement plus d'un si l'on doit distinguer les comportements de groupes d'individus différents et des taxes ou subsides différenciés suivant les types de consommateurs.

3. Définir la fonction de tarifs $\underline{T}(\underline{\Pi}, \underline{P})$ introduite en (3.16) et (3.17). Par exemple si le producteur i est taxé au taux a_i, et que le consommateur reçoit un subside au taux b_j, on posera

$$t_{ij} = a_i \Pi_i - b_j P_j \quad . \tag{4.28}$$

Si on considère d'autre part une facturation au coût moyen, plutôt qu'au coût marginal, en particulier dans le secteur de l'électricité, le coût moyen sera défini, pour le producteur i par

$$M_i(Q_i) = \frac{\int_o^{Q_i} \Pi_i(q)dq}{Q} \qquad (4.29)$$

et le tarif t_{ij} entre le producteur i et le consommateur j sera défini par

$$t_{ij} = -\Pi_i + M_i(Q_i) \qquad (4.30)$$

4. A partir d'un scénario de demande nominal, fourni par MEDEE, estimer les fonctions $P_j = g_j^k(D_j)$, où D_j est la demande du consommateur j, définies en (4.10). Pour cela il faudra réaliser une suite de simulations en perturbant successivement le prix de chaque forme d'énergie pour chaque période d'un faible montant (augmentation de 5% par exemple), tout en maintenant les autres prix constants.

Il est également possible d'ajuster les tarifs t_{ij} à chaque itération de l'algorithme de couplage, c'est-à-dire au moment même où l'on effectue l'approximation de la loi de demande par les fonctions $g_i^k(Q_i)$. Cette stratégie "interne", par opposition à la stratégie d'ajustement "externe" proposé par Greenberg et Murphy, permet d'espérer une réduction du nombre d'itérations du modèle MARKAL-Production.

Selon la suggestion faite par Daniel et Goldberg [5], il sera certainement avantageux d'utiliser aussi des élasticités "inflatées", obtenues en faisant varier non seulement le prix de la forme j en période t mais aussi le prix de la même forme pour toutes les périodes précédentes, pour construire les approximations constantes par morceaux des fonctions $g_k^i(Q_i)$.

5. Implanter, en adaptant l'algorithme de Hogan, l'algorithme de recherche d'un équilibre règlementé de Greenberg et Murphy.

En incorporant les éléments des deux algorithmes on résoudra une suite de problèmes de programmation linéaire de la forme suivante:

$$\text{Min } \underline{c}\,\underline{x} + \sum_j \left[\sum_i t_{ij}\, z_{ij} - \sum_\ell (P_{\ell j}\, y_{\ell j} - P_{-\ell j}\, y_{-\ell j})\right] \qquad (4.31)$$

s.c.

$$\underline{A}_1\,\underline{x} = \underline{b} \qquad (4.32)$$

$$\sum_j z_{ij} \leq Q_i \quad , \quad i = 1, \ldots, m \qquad (4.33)$$

$$\sum_i z_{ij} - \sum_\ell y_{\ell j} + \sum_\ell y_{-\ell j} \geq D_j \quad , \quad j = 1, \ldots, n \qquad (4.34)$$

$$\underline{x} \geq 0 \quad , \quad z_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \ldots, m \quad j = 1, \ldots, n \qquad (4.35)$$

$$0 \leq y_{\ell j},\, y_{-\ell j} \leq \Delta \qquad (4.36)$$

$$Q_i \geq 0, \quad i = 1, \ldots, m \qquad D_j \geq 0, \quad j = 1, \ldots, n \qquad (4.37)$$

où D_j représente la demande du consommateur j, Q_i l'offre du producteur i, et les variables $y_{\ell j}$ et $y_{-\ell j}$ correspondent à l'approximation des fonctions g_j^k par des fonctions constantes par morceaux.

On ajustera à chaque itération les tarifs t_{ij} selon la fonction $\underline{T}(\Pi, P)$. Lorsque la procédure sera stabilisée elle aura fourni un équilibre règlementé approximatif.

Si les conditions générales du scénario nominal restent encore valables on pourra réestimer de nouvelles fonctions $g_j^k(D_j)$ et améliorer l'approximation de l'équilibre.

Si les conditions du scénario nominal de MEDEE ne sont plus remplies, il faudra alors reprendre la procédure au point 4.

5. PREMIERES EXPERIENCES SUR LE COUPLAGE MEDEE-MARKAL

5.1 Evaluation des lois de demande à partir de MEDEE-3-QUEBEC

5.1.1 L'influence des prix sur la demande dans MEDEE

Dans MEDEE-3-QUEBEC, le vecteur de demande énergétique finale D est déterminé par la relation:

$$D = F(PRIX, BESEC, POL, DISP) \qquad (5.1)$$

où BESEC, POL et DISP représentent, respectivement, les variables indicatrices reliées aux besoins socio-économiques, aux politiques énergétiques, et aux disponibilités des différentes formes d'énergie. Ces variables sont fortement corrélées aux variables PRIX.

Dans le contexte du couplage, nous souhaitons obtenir, pour des vecteur BESEC, POL et DISP fixés(*), la relation fonctionnelle:

$$D = H(PRIX) \; . \qquad (5.2)$$

Les prix influencent la demande finale suivant des mécanismes de substitution interénergétique et d'économies d'énergie. Pour des vecteurs BESEC, POL, DISP fixés, l'intervention des prix dans MEDEE peut être décrite par le schéma suivant:

(*) Ces hypothèses impliquent que la demande utile totale est indépendante des prix, sauf dans le domaine du transport, comme on le verra plus loin.

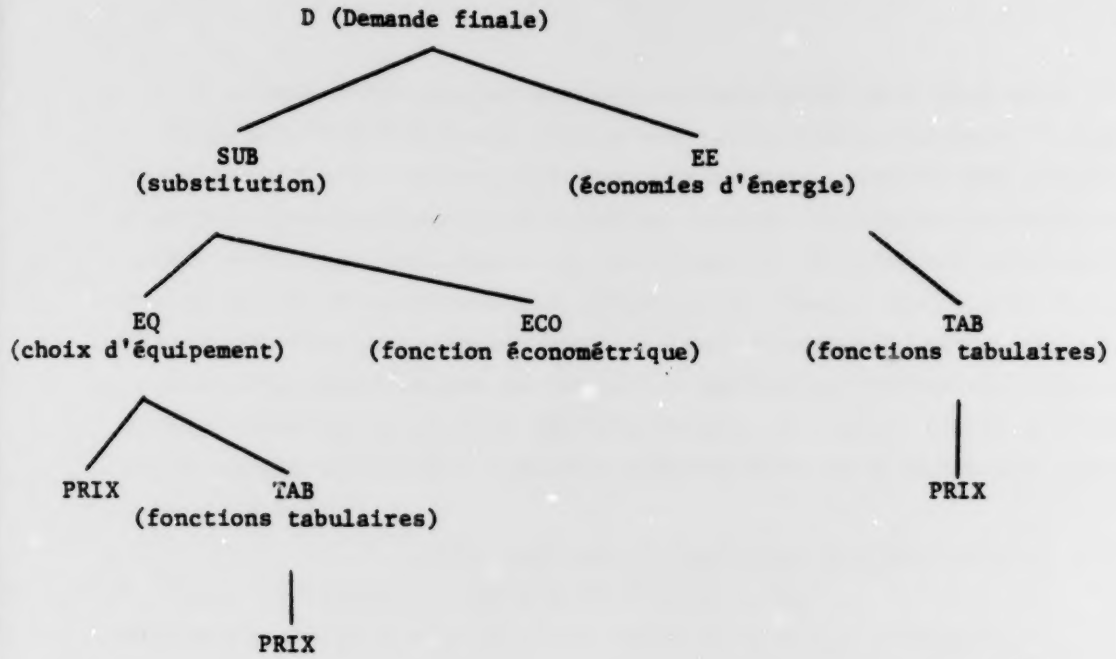


Figure 5.1: Les relations demande-prix dans MEDEE

Les économies d'énergies sont déterminées à l'aide de fonctions discrètes (fonctions "tabulaires") dépendant des prix relatifs des différentes formes d'énergie. Les effets de substitution sont obtenus à partir de données historiques (période 1962-1982) par le biais d'un modèle économétrique permettant d'établir le taux de décroissance des équipements au mazout. La substitution dépend également du choix des équipements, qui est influencé directement par les coûts (d'investissement, d'entretien, de fonctionnement) et indirectement par le biais de subventions, taxes additionnelles, etc. fournies dans les fonctions tabulaires.

Ces fonctions traduisent quantitativement des états décrits à l'aide de scénarios qualitatifs, par exemple des hypothèses d'experts, enquêtes, simulations; leurs valeurs sont ensuite utilisées à l'intérieur de relations comptables. Puisque de telles fonctions ne permettent pas de simuler très finement des variations de la demande résultant d'une variation de prix, leurs valeurs seront maintenues constantes à chaque itération de couplage. Par conséquent, les relations demande-prix observées dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel seront entièrement dues aux effets de substitution. Dans le secteur des transports par contre, MEDEE utilise des élasticités-prix calculées à partir d'un modèle économétrique.

5.1.2 Perturbation des scénarios de prix dans MEDEE

Les demandes initiales de MEDEE découlent d'un scénario d'évolution des prix sectoriels des différentes formes d'énergie. Ce scénario prévoit une croissance économique forte (3% annuellement). Après une baisse temporaire des prix des produits pétroliers, en termes réels, de 1983 à 1990, les prix passant de 26$(*) à 23$(*), une hausse soutenue de la demande entraîne des augmentations annuelles de prix de 2% jusqu'en 2006, pour atteindre 32$(*) à cette date.

Dans le secteur résidentiel, le prix de l'électricité est maintenu à 90% de celui du mazout léger pour la période 1983-1990, et 95% pour la période 1991-2006. Le prix du gaz naturel est maintenu à 70% de celui du mazout léger pour toute la période de planification.

Dans le secteur commercial, on retient l'hypothèse d'une amélioration de la position concurrentielle de l'électricité par rapport au pétrole; le prix relatif de l'électricité par rapport au pétrole diminuant de 6.25%.

(*) Prix par baril en dollars de 1980.

Dans le secteur industriel, l'hypothèse du maintien à long terme des prix relatifs actuels a été retenue. Cependant, il est prévu que la tarification de l'électricité pour les usages de chauffe s'effectue à un niveau plus élevé que le coût moyen. Le prix du pétrole est maintenu à 80% du prix du brut, et aucune importation de mazout lourd n'est prévue.

Pour chaque forme d'énergie, un prix moyen est obtenu en pondérant les prix sectoriels par les parts de marché correspondantes. A partir du scénario de base, des couples demande-prix sont obtenus en perturbant le prix d'une seule forme d'énergie, simultanément pour toutes les périodes considérées.

5.1.3 Ajustement des courbes de demande locales

5.1.3.1 L'électricité

Le modèle théorique utilisé pour l'ajustement des lois de demande locales est un modèle à élasticité constante.

$$Q = f(P) = kP^{e} \tag{5.3}$$

où e représente l'élasticité-prix directe, P le prix moyen de l'électricité en dollars de 1980 et Q la demande totale d'électricité pour la période considérée (en PJ). En réécrivant (5.3) sous la forme:

$$\ell n\ Q = \ell n\ k + e\ \ell n\ P \tag{5.4}$$

on peut obtenir les coefficients k et e à l'aide d'une régression simple faisant intervenir les prix annuels perturbés* par les facteurs: +10%, -10%, -15%, -30%, ainsi que les demandes fournies par MEDEE-3-QUEBEC. On obtient ainsi les paramètres suivants:

---

* Ces prix comprennent la taxe de vente provinciale.

Périodes*	2	3	4	5	6
e	-.203	-.300	-.320	-.323	.337
k($80/GJ)	696	974	1196	1337	1536
r**	.97	.97	.98	.99	.99

* Périodes: 1: 1978-1982; 2: 1983-1987; 3: 1988-1992;
4: 1993-1997; 5: 1998-2002; 6: 2003-2007.

** r: coefficient d'ajustement entre les données prédites et observées.

Tableau 5.1 Paramètres de la loi de demande (électricité)

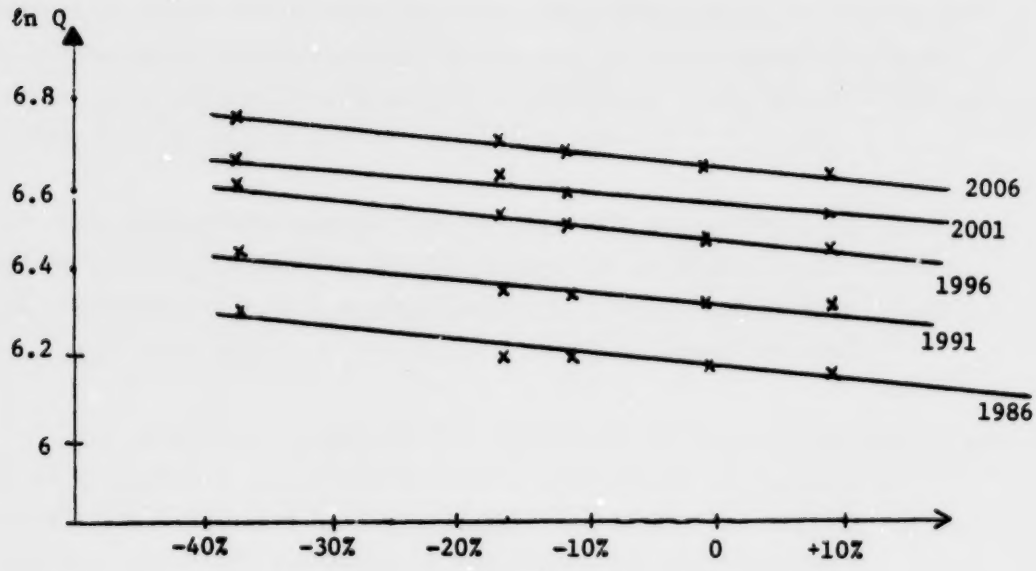


Figure 5.2: Ajustement Log-linéaire selon la formule (5.4)

5.1.3.2 Gaz naturel

Etant donnée l'aspect concave des points fournis par MEDEE (voir Figure 5.3) nous avons utilisé un modèle quadratique pour représenter les relations demande-prix:

$$Q_i = AP_i^2 + BP_i + C \qquad (5.4)$$

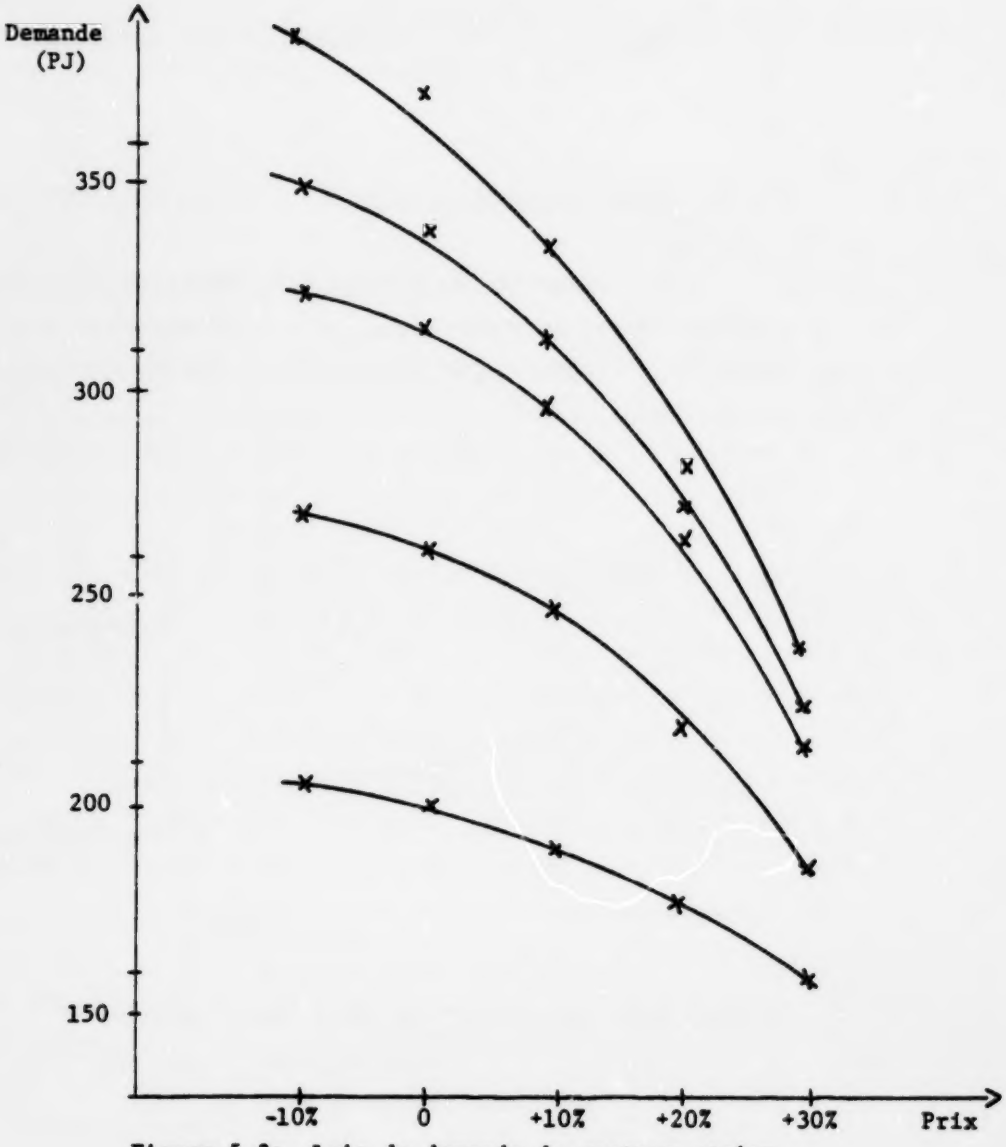


Figure 5.3: Lois de demande du secteur gazier

Les coefficients A, B et C sont données dans le tableau ci-dessous:

Périodes	2	3	4	5	6
A	-15.54	-33.80	-39.56	-27.98	-22.61
B	99.9	236.3	306.4	221.0	182.2
C	43	-145	-272	-88	21

Tableau 5.2 Coefficients des lois de demande du secteur gazier.

5.1.3.3 Produits pétroliers

A l'exception du secteur des transports où l'élasticité est fournie par le modèle ENEQ [4], la demande est constante à une itération donnée. On obtient ainsi une loi de demande locale de la forme:

$$Q = k_1 + kP^e \qquad (5.5)$$

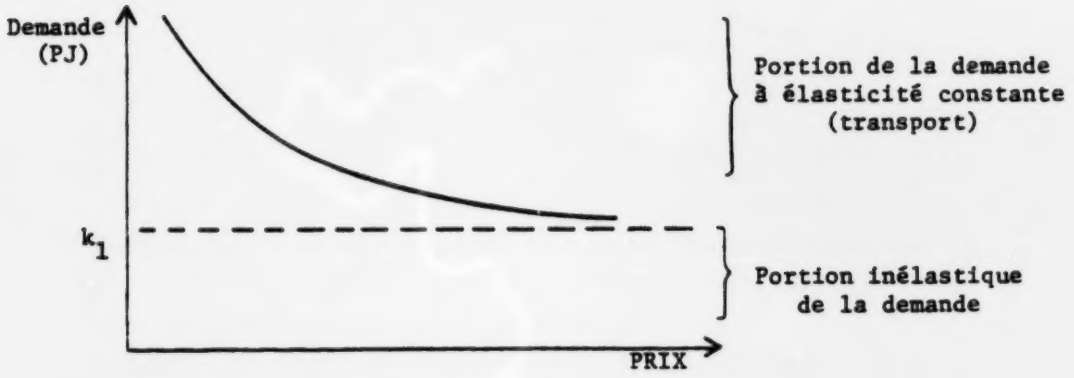


Figure 5.4: Loi de demande des produits pétroliers (forme générale).

Les coefficients k_1, k et e sont donnés au tableau ci-dessous.

Périodes	2	3	4	5	6
k_1	425	423	449	469	496
k	624	472	424	403	387
e	-.38	-.38	-.38	-.38	-.38

Tableau 5.3 Coefficients des lois de demande du secteur pétrolier

5.2 Une itération de l'algorithme PIES de Hogan

A chaque itération de l'algorithme PIES de Hogan, la loi de demande vectorielle $\underline{P}_d(\underline{Q})$ est approximée par trois lois de demande $P_i(Q_i)$, une pour chaque forme d'énergie. Les résultats fournis dans les tableaux 5.4 et 5.5 ne constituent donc pas un équilibre: il se peut en effet que les demandes Q_1 ne correspondent plus aux prix P_1 de MEDEE.

Périodes	$P_d(Q_0)$	Q_0	P_0	Q_1	P_1	Δ%
1	6.71	371	5.78	371	5.78	0
2	6.31	453	5.43	462	7.77	+2.00
3	6.45	554	8.61	520	8.35	-6.21
4	6.77	645	8.61	606	8.61	-6.00
5	7.30	696	8.61	668	8.61	-4.00
6	7.70	762	9.06	732	9.06	-4.00

Q_0 : demandes initiales
Q_1 : demandes après une itération
Δ% : variation de la demande
P_0 : prix initiaux
P_1 : prix après une itération

Tableau 5.4 Résultats du couplage (électricité)

Périodes	$P_d(Q_0)$	Q_0	P_0	Q_1	P_1	ΔZ
1	3.60	105	3.60	105	3.60	0
2	3.92	198	3.92	200	3.92	1
3	4.00	260	4.00	260	4.00	0
4	4.20	312	4.20	315	4.20	1
5	4.48	336	4.48	339	4.48	1
6	4.79	369	4.79	373	4.79	1

Tableau 5.5 Résultats du couplage (gaz naturel)

Dans le secteur pétrolier, il n'y a aucune modification:

$$P_0 = P_1 \quad \text{et} \quad Q_0 = Q_1 \ .$$

5.3 Interprétation des résultats

La principale conclusion que l'on puisse tirer des tableaux 5.4 et 5.5 est la similarité entre la tarification retenue par MEDEE et la tarification au coût marginal utilisée dans le cadre du couplage. Dans le secteur des produits pétroliers on constate que les prix et demandes de MEDEE constituent des prix d'équilibre. Dans le secteur gazier, bien que les prix ne varient pas, les demandes s'ajustent légèrement. Par contre, on observe dans le secteur de l'électricité, à moyen terme, un réajustement à la baisse des prix et demandes, les coûts marginaux de MARKAL-Production étant nettement supérieurs aux coûts du scénario de base MEDEE. Il est probable que cette sous-estimation de la demande provient de la tarification adoptée (tarification au coût marginal et non au coût moyen). Cette hypothèse sera confirmée, ou infirmée, par des expérimentations ultérieures.

Par contre, aux deux premières périodes, le coût marginal est inférieur au prix dérivé de MEDEE, ce qui peut s'expliquer par la présence d'excédents de production et une certaine "myopie" à long terme due à la continuité des fonctions d'investissement.

Cet aspect d'une modélisation purement linéaire peut être contourné en introduisant des bornes sur les investissements dans plusieurs exécutions successives du modèle.

Etant donné le caractère expérimental de cet exemple, nous ne pousserons pas plus avant l'analyse des résultats.

5.4 Développements à venir

Le but ultime du couplage consiste à faire converger le processus itératif décrit précédemment vers une solution d'équilibre. Les étapes qui restent à franchir sont les suivantes:

1. Déterminer l'ensemble des producteurs et consommateurs considérés dans le couplage. Un tel choix doit tenir compte de l'accessibilité des lois de demande correspondantes, ainsi que des prix agrégés significatifs. Dans certains cas, l'on pourra considérer, pour un même combustible, des producteurs distincts correspondant à des secteurs dont les comportements sont distincts.

2. Déterminer les lois de demande locales à l'aide de MEDEE, pour les itérations subséquentes.

3. Adapter les coûts marginaux de MARKAL aux prix payés par les consommateurs. Ces ajustements doivent tenir compte des différentes structures tarifaires: taxes, subventions, tarification ou coût moyen, etc.; ils seront effectués suivant la méthodologie proposée par Greenberg et Murphy, soit à l'intérieur d'une itération du modèle PIES (introduction simultanée des nouvelles courbes de demande locales et des différences entre coût marginal et coût facturé), soit dans une boucle extérieure.

Cette dernière alternative, qui est celle proposée par Greenberg et Murphy, exige l'implantation itérative du modèle PIES et sera donc beaucoup plus "coûteuse" en temps d'exécution. Cependant, la convergence globale est garantie sous des hypothèses raisonnables.

6. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons exposé une méthodologie de couplage entre des modèles d'offre et de demande dans le secteur énergétique au Québec. Nous avons montré qu'il était possible d'utiliser MEDEE-3-QUEBEC comme modèle de demande, c'est-à-dire qu'il réagissait à des modifications relativement faibles des seuls facteurs prix, et que le logiciel MARKAL-QUEBEC pouvait être adapté à une situation où la demande finale était exogène, et ne dépendait donc pas de la compétition entre technologies d'usage.

Le modèle de couplage, une fois complété, fournira un outil d'analyse de scénarios énergétiques pour le Québec, par le biais de modifications des hypothèses de croissance économique, des coûts des formes d'énergie, ainsi que du comportement des consommateurs. Il permettra également de valider certaines hypothèses de prix, et d'étudier l'impact des politiques de tarification sur le système énergétique au Québec.

REFERENCES

[1] AHN, B.Y. et HOGAN, W.W. (1982), "On convergence of the PIES algorithm for computing equilibria", Operations Research.

[2] ALTDORFER, F. (1981), "Introduction of price elasticities on energy demand in MARKAL", Memo #345, KFA, Jülich.

[3] CAO, M.H. (1981), "Les potentialités de substitution inter-énergétique au Québec", Ministère de l'énergie et des ressources, Gouvernement du Québec.

[4] CAO, M.H. (1980), "Un modèle économétrique de la demande d'énergie au Québec et deux scénarios de demande", MER-Energie-Québec.

[5] DANIEL, T.E. et GOLDBERG, H.M. (1981), "Dynamic Equilibrium energy modeling: The Canadian BALANCE model", Operations Research, Vol. 29, #5.

[6] GREENBERG, H.J. et MURPHY, F.H. (1982), "Computing regulated market equilibria with mathematical programming", School of Business Administration, Temple University.

[7] HAURIE, A. et al. (1983), "MEDEE-MARKAL-QUEBEC: Couplage entre un modèle de simulation de la demande d'énergie et un modèle d'optimisation de l'offre", GERAD, Ecole des HEC, Montréal, Cahier G-83-08.

[8] HOGAN, W.W. (1975), "Energy policy models for Project Independence", Computers and Operations Research, 2.

[9] LARDINOIS, C. (1981), "MARKAL-QUEBEC: Implantation d'un modèle d'analyse systémique de l'avenir énergétique québécois", GERAD, Ecole des HEC, Montréal, Cahier G-81-09.

[10] LOULOU, R. et al. (1983), "MARKAL-Production: Un modèle du secteur de production énergétique du Québec", GERAD, Ecole des HEC, Cahier G-83-10.

[11] MARCHON, M.N. et Van PEETERSSEN, A. (1981), "Impact de la substituabilité entre facteurs causé par le changement de prix relatif de l'énergie", Ecole des HEC, Montréal, Rapport de recherche no 81-22.

[12] MEDEE-QUEBEC (INRS-Energie) (1984), "L'implantation de MEDEE-3-QUEBEC: La méthodologie", Ministère de l'Energie et des Ressources, Québec.

[13] SAMUELSON, P.A. (1966), Foundations of economic analysis, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

[14] SCARF, H. et HANSEN, T. (1973), Computation of economic equilibria, Yale University Press.

[15] TAKAYAMA, T. et JUDGE, G.G. (1971), Spatial and temporal price and allocation models, North-Holland, Amsterdam.